

# Matematički model nestacionarnog strujanja na primjeru toka Stare Neretve

---

Tepić, Ante

Master's thesis / Diplomski rad

2018

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:867784>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-09**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ante Tepić**

**Split, 2018.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Ante Tepić**

**Matematički model nestacionarnog strujanja na  
primjeru toka Stare Neretve**

**Diplomski rad**

**Split,2018.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**  
KANDIDAT: **Ante Tepić**  
BROJ INDEKSA: **633**  
KATEDRA: **Katedra za hidromehaniku i hidrauliku**  
PREDMET: **Hidraulika**

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema:

Matematički model nestacionarnog strujanja na primjeru toka Stare Neretve

Opis zadatka:

U okviru diplomskog rada potrebno je postaviti matematički model nestacionarnog tečenja u otvorenim koritima u mirnom režimu strujanja. Zadatak riješiti metodom konačnih elemenata izradom vlastitog programa u Fortran-u. Matematički model je potrebno primijeniti na rukavcima Stare gornje i donje Neretve, s naglaskom na mogućnost osvježanja vode u rukavcima.

U Splitu, 08. ožujka, 2018.

Voditelj Diplomskog rada:

Doc. dr. sc. Davor Bojanić

Predsjednik Povjerenstva

za završne i diplomske ispite:

Doc. dr. sc. Veljko Srzić

# **Matematički model nestacionarnog strujanja na primjeru toka Stare Neretve**

## *Sažetak:*

U ovom diplomskom radu izvršena je analiza nestacionarnog strujanja u rukavcima Stare gornje i donje Neretve te je dana odgovarajuća interpretacija rezultata. Izrađen je matematički model strujanja u programskom jeziku FORTRAN95 na temelju jednadžbi nestacionarnog strujanja. Provedena je analiza dinamike piezometarskih stanja, protoka i brzina strujanja u rukavcima za varijantu spoja rukavaca sa cijevi i s otvorenim kanalom.

## *Ključne riječi:*

matematički model, nestacionarno strujanje, piezometarska stanja, protok, rukavci, Stara Neretva

# **Mathematical model of non-steady flow on the example of flow in inlets of Stara Neretva**

## *Abstract:*

In this graduate thesis a non-stationary flow analysis was performed in river inlets of Stara gornja and donja Neretva, and an appropriate interpretation of the results was given. A mathematical model of flow in the FORTRAN95 programming language was developed based on the non-stationary flow equations. Analysis of dynamics of piezometric states, discharge and flow velocity was conducted, in river inlets in both cases – river inlets linked with a pipe, or an opened channel.

## *Keywords:*

mathematical model, non-stationary flow, piezometric states, discharge, river inlets, Stara Neretva

# SADRŽAJ

1.	UVOD	1
2.	TEORIJSKE OSNOVE MATEMATIČKOG MODELA	3
2.1.	STACIONARNO STRUJANJE U BLAGIM OTVORENIM KORITIMA	3
2.1.1.	Specifična energija blago nagnutog korita	3
2.1.2.	Srednja brzina tečenja u blago nagnutom koritu	5
2.1.3.	Provodljivost poprečnog presjeka	6
2.2.	NESTACIONARNO STRUJANJE U OTVORENIM KORITIMA	7
2.2.1.	Jednadžba kontinuiteta	7
2.2.2.	Dinamička jednadžba tečenja	9
2.2.3.	Zakon očuvanja količine gibanja	10
3.	MATEMATIČKI MODEL TEČENJA U OTVORENOM KORITU	13
3.1.	UVOD	13
3.2.	OPIS MODELA	13
3.3.	FORMULACIJA MATEMATIČKOG MODELA	14
3.3.1.	Jednadžbe tečenja za konačni element	14
3.3.2.	Integracija diferencijalnih jednadžbi	19
3.4.	GLOBALNI SUSTAV JEDNADŽBI	23
3.4.1.	Newton-Raphson metoda rješavanja sustava nelinearnih jednadžbi	23
3.4.2.	Slaganje globalnog sustava jednadžbi	24
3.4.3.	Uvrštavanje rubnih uvjeta	29
4.	PRORAČUN	30
4.1.	ULAZNI PODATCI	30
4.1.1.	Geometrijske karakteristike ustave	30
4.1.2.	Geometrijske karakteristike cijevi	32
4.1.3.	Geometrijske karakteristike kanala	34
4.1.4.	Rubni uvjeti	40
4.1.5.	Formiranje ulaznog file-a	42
4.2.	RJEŠENJA PRORAČUNA	44
4.2.1.	Varijanta sa cijevi	44
4.2.2.	Varijanta s kanalom	51
5.	RASPRAVA	58
6.	FORTTRAN 95 PROGRAMSKO RJEŠENJE	60
6.1.	PREDPROGRAM	60
6.2.	GLAVNI PROGRAM	65
7.	ZAKLJUČAK	75
8.	LITERATURA	76
9.	PRILOZI	77



U rukavcima živi nešto riječne ribe i velika kolonija žaba. Ljeti je jako izražen problem pojave komaraca i neugodnih mirisa usred organskog truljenja i drugih procesa (povremeni pomor ribe), što je osobito izraženo kod Stare gornje Neretve zbog ne povezanosti s glavnim tokom Neretve.



*Slika 2 Postojeća ustava na Staroj donjoj Neretvi (Kula Norinska)*



*Slika 3 Rukavac Stara gornja Neretva*



*Slika 4 Rukavac Stara donja Neretva*



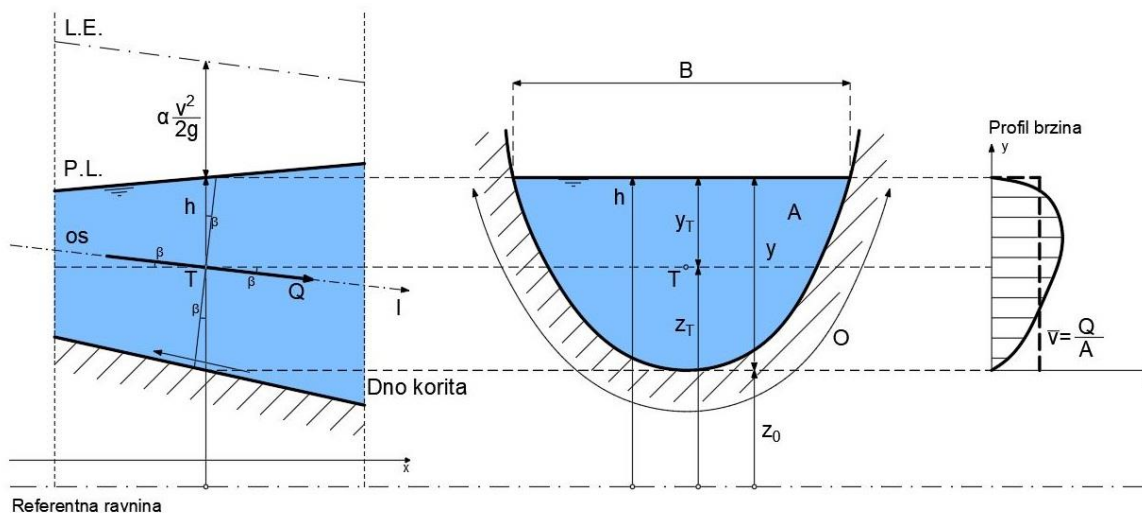
## 2. TEORIJSKE OSNOVE MATEMATIČKOG MODELA

Svrha razvijenog matematičkog modela je opis nestacionarnog i nejednolikog tečenja u blago nagnutom otvorenom koritu, s promjenjivom geometrijom poprečnog presjeka i promjenjivim nagibom dna korita. S druge strane, formulacija modela je zamišljena tako da su geometrijske karakteristike konačnog elementa i brzina tečenja u konačnom elementu u jednom vremenskom koraku ipak nepromjenjive, odnosno može se reći da je tečenje na konačnom elementu u jednom konačnom vremenskom koraku stacionarno. Upravo zbog ovoga, potrebno je uvesti teorijske osnove stacionarnog i nestacionarnog tečenja.

### 2.1. STACIONARNO STRUJANJE U BLAGIM OTVORENIM KORITIMA

#### 2.1.1. SPECIFIČNA ENERGIJA BLAGO NAGNUTOG KORITA

Strujanje u otvorenim koritima moguće je promatrati kao jednodimenzionalno strujanje koje se, u svojoj osnovi, ne razlikuje od samog strujanja u cijevima. Tako se strujanje odvija uzduž osi duljine  $l$  koja spaja težišta dva poprečna presjeka koja su postavljena okomito na os tečenja (Slika 5). Pretpostavka je da je strujanje s razvijenim graničnim slojem, što rezultira razvijanjem profila brzine. U svrhu analize jednodimenzionalnog strujanja uzima se srednja brzina profila,  $\bar{v}$ .



Slika 5 Tok u blago nagnutom koritu

Pod blago nagnuta korita smatramo ona korita čiji je kut  $\beta \approx 0$ , tj.  $\cos\beta \cong 1$ . U tom slučaju longitudinalna varijabla,  $l$ , može biti zamijenjena horizontalnom udaljenošću,  $x$ . Također se, u slučaju blago nagnutog korita, može reći da su poprečni presjeci postavljeni vertikalno te da je brzina tečenja horizontalna.

Piezometarska linija, koja se poklapa sa linijom vodnog lica, je jednaka:

$$h = z_T + \frac{p_T}{\rho g} = z_T + y_T \quad (1)$$

$$z_T + y_T = z_0 + y \quad (2)$$

Specifična energija u blago nagnutom koritu je jednaka:

$$H = z_0 + y + \frac{\alpha \bar{v}^2}{2g} = h + \frac{\alpha \bar{v}^2}{2g} \quad (3)$$

Promatra se strujanje realne tekućine, što podrazumijeva postojanje disipacije energije u smjeru tečenja, stoga se specifična energija ne smanjuje duž toka. Gubitak energije se može zapisati kao:

$$\frac{dH}{dl} + \frac{\tau_0}{\rho g R} = \frac{dH}{dl} + J_e = 0 \quad (4)$$

gdje  $J_e$  označava gradijent energije duž osi  $l$ .

Bitno je razlikovati gradijent linije energije  $J_e = dH/dl$  i nagib linije energije  $I_e = dH/dx$ . Gradijent linije energije je mjera smanjenja energije duž osi  $l$ , dok nagib linije energije predstavlja tangens kuta između osi tečenja i horizontalne osi  $x$  (Slika 5). Kod strmih korita te dvije vrijednosti nisu jednake, međutim kod blago nagnutih korita, zbog male vrijednosti kuta,  $\beta \approx 0$ , nagib i gradijent su približno jednaki.

$$dx = dl \cdot \cos\beta; \cos\beta \cong 1 \quad (5)$$

$$\frac{dH}{dl} = \frac{dH}{dx} \cdot \frac{dx}{dl} = \cos\beta \cdot \frac{dH}{dx} \quad (6)$$

Iz jednakosti (5)  $J_e = I_e \cdot \cos\beta = I_e$ , pa jednadžbu za energiju blago nagnutih korita možemo zapisati kao:

$$\frac{dH}{dx} + I_e = 0 \quad (7)$$

Nagib linije energije definiran je srednjim koeficijentom trenja duž omočenog dijela poprečnog presjeka:

$$I_e = \frac{\tau_0}{\rho g R} \quad (8)$$

$$\frac{dH}{dx} + \frac{\tau_0}{\rho g R} = 0 \quad (9)$$

### 2.1.2. SREDNJA BRZINA TEČENJA U BLAGO NAGNUTOM KORITU

Trenje u omočenom dijelu poprečnog presjeka, uz pretpostavku potpuno razvijenog graničnog sloja, definiramo kao:

$$\tau_0 = c_f \cdot \frac{1}{2} \rho \bar{v}^2 \quad (10)$$

gdje  $\bar{v}$  predstavlja srednju brzinu razvijenog profila brzina, a  $c_f$  srednji koeficijent trenja duž omočene površine korita s razvijenim graničnim slojem.

Nagib linije energije,  $I_e$ , se stoga može zapisati kao:

$$I_e = \frac{c_f \cdot \bar{v}^2}{R \cdot 2g} \quad (11)$$

Iz prethodnog izraza možemo zapisati izraz za srednju brzinu tečenja u otvorenom koritu:

$$\bar{v} = \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{c_f}} \cdot \sqrt{R \cdot I_e} \quad (12)$$

Ovako napisan izraz za brzinu zove se Chezy-eva formula, gdje se prvi član  $\sqrt{2g}/\sqrt{c_f}$  naziva Chezy-ev koeficijent,  $C$ . Dokazano je da  $C$  nije konstantan za svaki poprečni presjek kako se u početku smatralo. [1]

Najčešće korišten izraz za računanje brzine otvorenog korita je Manning-ova formula.

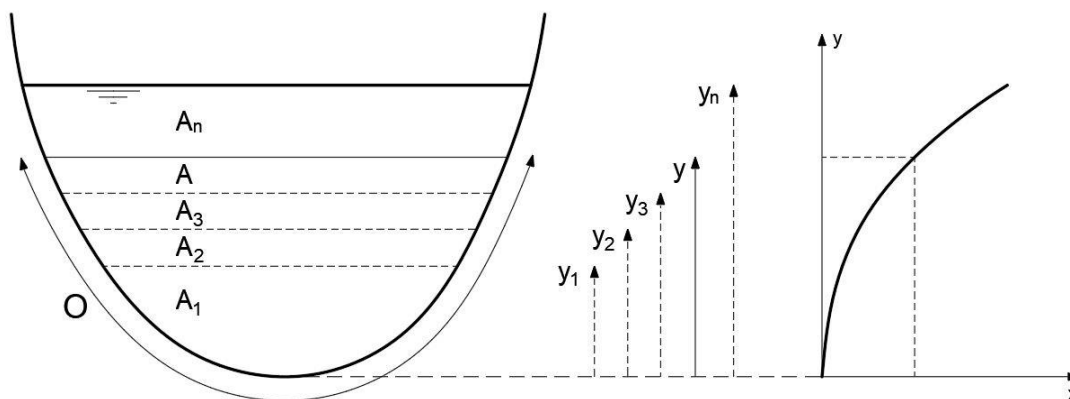
$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{I_e} \quad (13)$$

Zbog jednostavnosti formule i obilja podataka o hrapavosti  $n$  korita od različitih materijala, danas se najčešće koristi u proračunima.

U modelu je korištena Manning-Strickler-ova formula, koja za razliku od Manning-ove ovisi o glatkosti korita. Glatkost je izražena kao recipročna vrijednost hrapavosti kao  $K = 1/n$ .

$$v = K \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{I_e} \quad (14)$$

### 2.1.3. PROVODLJIVOST POPREČNOG PRESJEKA



Slika 6 Krivulja protoka

Za predodređenu dubinu  $y$ , može se odrediti omočena površina poprečnog presjeka  $A$  i omočeni opseg  $O$ , što daje vrijednost hidrauličkog radijusa poprečnog presjeka (Slika 6). Uz poznat Strickler-ov koeficijent  $K$  i hidraulički radijus  $R$ , iz Manning-Stricklerove formule za brzinu računa se provodljivost korita  $C(y)$ .

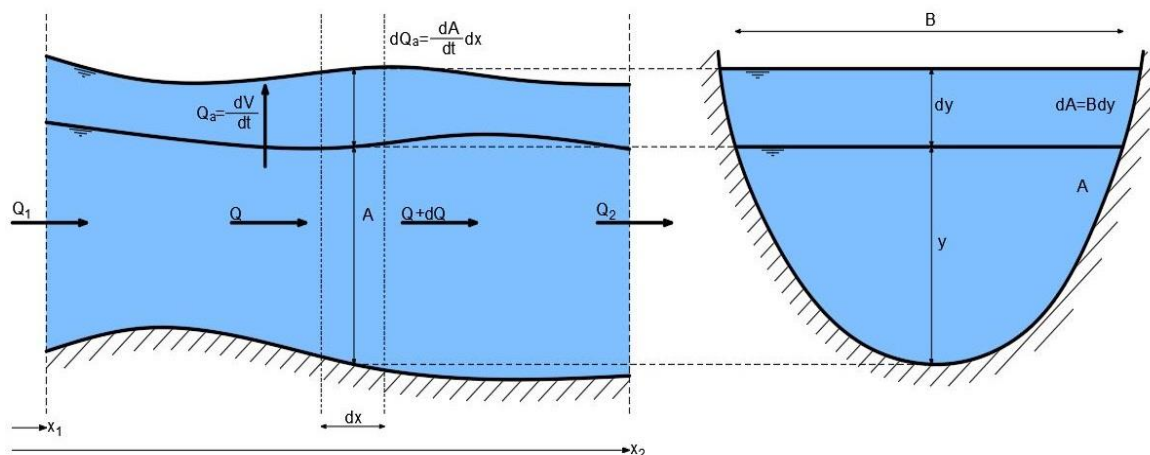
$$Q(y) = C(y) \cdot \sqrt{I_e} \quad (15)$$

$$C(y) = K \cdot \frac{A^{\frac{5}{2}}}{O^{\frac{5}{3}}} \quad (16)$$

Provodljivost  $C \left( \frac{m^3}{s} \right)$  predstavlja protok za jedinični nagib linije energije, te je funkcija geometrijskih karakteristika i otpora korita.

## 2.2. NESTACIONARNO STRUJANJE U OTVORENIM KORITIMA

### 2.2.1. JEDNADŽBA KONTINUITETA



Slika 7 Zakon očuvanja mase

Između dvije proizvoljno odabrane stacionaže (Slika 7) postavlja se zakon očuvanja u obliku masenog protoka  $\dot{M} = \rho \cdot Q$ .

$$\dot{M}_a + \dot{M}_2 - \dot{M}_1 = 0 \quad (17)$$

$\dot{M}_1$  predstavlja protok mase koji ulazi u kontrolni volumen,  $\dot{M}_2$  protok mase koji izlazi iz kontrolnog volumena, a  $\dot{M}_a$  prihranjivanje protoka mase unutar volumena. Ako se pretpostavi da je tekućina nestišljiva, zakon očuvanja se može napisati u obliku volumnog protoka:

$$Q_a + Q_1 - Q_2 = 0 \quad (18)$$

Prihranjivanje tj. akumulaciju protoka  $Q_a$  koji se očituje u vremenu kao podizanje ili spuštanje razine vode definirano je kao:

$$Q_a = \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \cdot \int_{x_1}^{x_2} A dx \quad (19)$$

Uvrštavanjem izraza (19) u zakon očuvanja dobije se integralni oblik zakona očuvanja masa:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + Q_1 - Q_2 = 0 \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \cdot \int_{x_1}^{x_2} A dx + Q_1 - Q_2 = 0 \quad (21)$$

### Diferencijalni zapis zakona očuvanja mase

Koristeći se osnovnim integracijskim metodama, jednačba (21) se može zapisati kao:

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial A}{\partial t} dx + \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial Q}{\partial x} dx = \int_{x_1}^{x_2} \left( \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \right) dx = 0 \quad (22)$$

Zakon očuvanja mora biti valjan za bilo koje odabrane presjeke  $x_1$  i  $x_2$ , stoga podintegralna funkcija mora biti jednaka nuli:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (23)$$

Ovako zapisana jednačba predstavlja diferencijalni oblik jednačbe kontinuiteta za nestacionarno tečenje u otvorenim koritima. Predstavlja zakon očuvanja mase na elementarnom volumenu diferencijalno male duljine  $dx$  (Slika 7).

### Specijalni oblik jednačbe kontinuiteta

Prvi član diferencijalne jednačbe kontinuiteta koji predstavlja akumuliranje volumena može se raspisati u lančani oblik derivacija:

$$\frac{\partial A}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (24)$$

Ako je poznato da je  $dA = B \cdot dh$  pa je diferencijalna jednačba:

$$B \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (25)$$

Prvi član se može zapisati uz dodatak izraza za elementarnu brzinu vala  $c = \sqrt{g \frac{A}{B}}$

$$\frac{gA}{gA} B \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{gA}{c^2} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (26)$$

$$\frac{gA}{c^2} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (27)$$

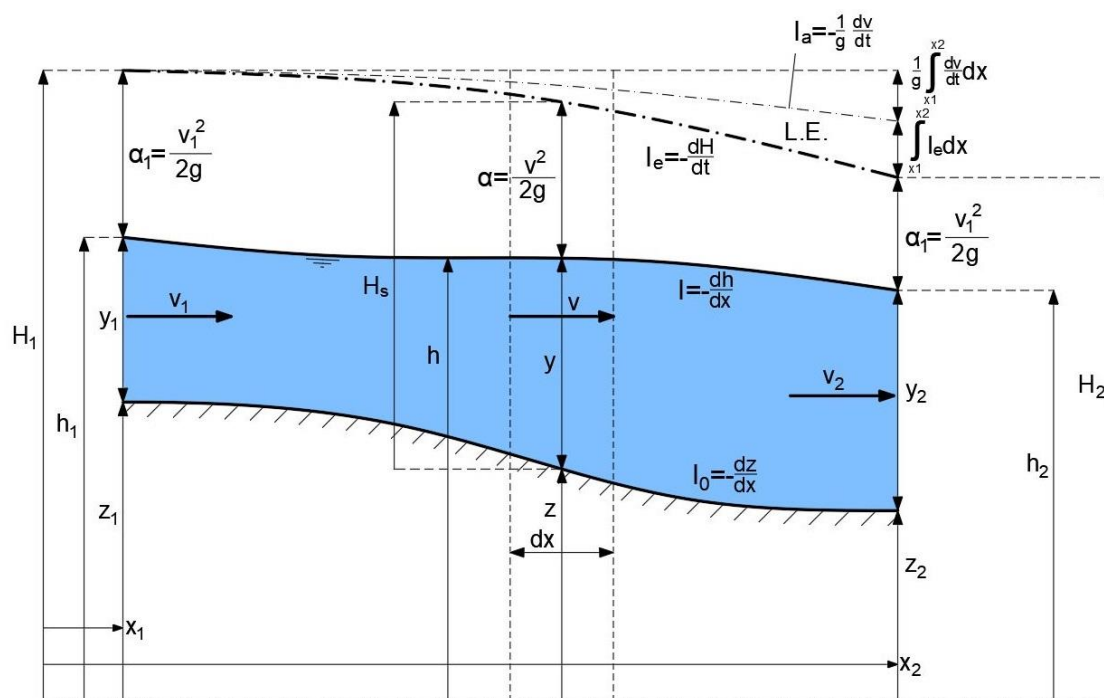
Jednačba kontinuiteta se sad može integrirati između dvije pozicije  $x_1$  i  $x_2$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{gA}{c^2} \frac{\partial h}{\partial t} dx + Q_2 - Q_1 = 0 \quad (28)$$

gdje integral predstavlja drukčiji zapis za akumuliranje protoka unutar volumena

$$Q_a = \frac{\partial V}{\partial t} = \int_{x_1}^{x_2} \frac{gA}{c^2} \frac{\partial h}{\partial t} dx \quad (29)$$

## 2.2.2. DINAMIČKA JEDNADŽBA TEČENJA



Slika 8 Odnos tlakova i energije kod nestacionarnog tečenja

Slika 8 prikazuje relativne odnose članova dinamičke jednadžbe tečenja na elementu konačne duljine  $x_2 - x_1$ , kao i na elementu diferencijalno male duljine  $dx$ .

Dinamička jednadžba utemeljena je na zakonu očuvanja energije između dva presjeka. Energija u nizvodnom presjeku  $x_2$  je jednaka energiji u presjeku  $x_1$  umanjenoj za dio energije koji se potroši zbog trenja, te energije koja je potrebna za ubrzanje vode. [4]

Dinamička jednadžba se može zapisati za element duljine  $dx$  u visinskom obliku:

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + I_e = 0 \quad (30)$$

gdje je:

$\frac{\partial H}{\partial x}$  – promjena ukupne energije u presjeku

$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$  – energija potrebna za ubrzanje vode

$I_e$  – gradijent linije energije

$$H = z + y + \alpha \frac{v^2}{2g} = z + H_s = h + \alpha \frac{v^2}{2g} \quad (31)$$

Nagib linije energije izražen preko vodljivosti presjeka  $C$

$$I_e = \frac{\tau_0}{\rho g R} = \frac{c_f}{2gR} |v|v = \frac{|Q|Q}{C(y)} \quad (32)$$

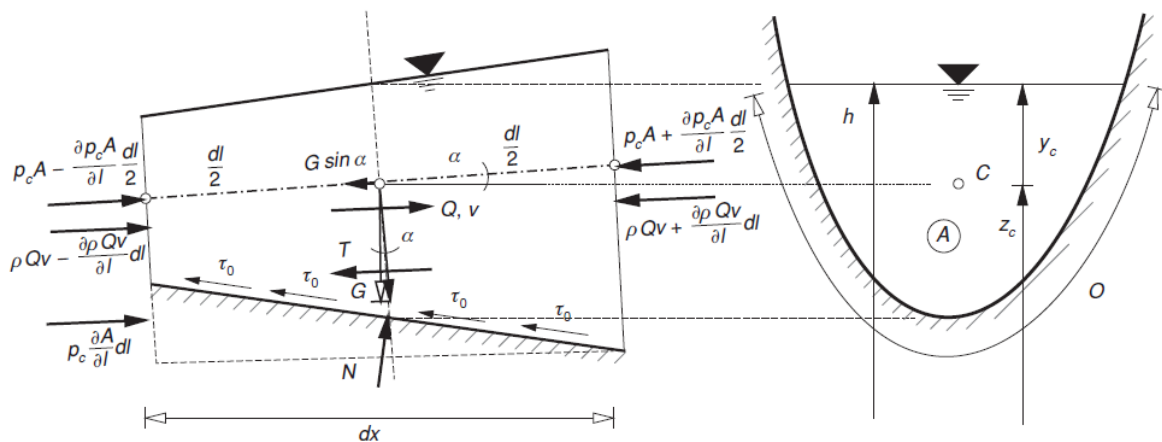
Diferencijalni oblik dinamičke jednadžbe

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} + g(I_e - I_0) = 0 \quad (33)$$

Ako se jednadžba integrira između dva proizvoljno odabrana profila  $x_1$  i  $x_2$  dobije se integralni oblik dinamičke jednadžbe

$$H_2 - H_1 + \int_{x_1}^{x_2} I_e dx + \frac{1}{g} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial v}{\partial t} dx = 0 \quad (34)$$

### 2.2.3. ZAKON OČUVANJA KOLIČINE GIBANJA



Slika 9 Sile koje se javljaju u elementu [5]

Polazi se od drugog Newton-ovog zakona, koji se odnosi na dinamičku ravnotežu između promjene količine gibanja i djelujuće sile

$$\frac{d}{dt} m \vec{v} = \sum \vec{F} \quad (35)$$

Zakon očuvanja količine gibanja počiva na diferencijalnom elementu (Slika 9) uz pretpostavke da je tečenje jednodimenzionalno duž osi tečenja, poprečni presjeci okomiti na os tečenja, raspodjela tlaka u poprečnom presjeku hidrostatička te da je protok količine gibanja jednolik. Najprije treba promotriti dinamičku ravnotežu sila u smjeru tečenja. Ukupna promjena količine gibanja u kontrolnom volumenu, koja se sastoji od promjene količine gibanja unutar volumena i razlike zbog količine gibanja kroz presjeke, može se zapisati kao:

$$\frac{d}{dt} m v = \frac{\partial \rho A v}{\partial t} + \left( \rho Q v + \frac{\partial \rho Q v}{\partial l} \frac{dl}{2} \right) - \left( \rho Q v - \frac{\partial \rho Q v}{\partial l} \frac{dl}{2} \right) \quad (36)$$

gdje je  $v$  srednja brzina u presjeku.



Nakon sređivanja prethodnog izraza dobije se brzina promjene količine gibanja kontrolnog volumena

$$\frac{d}{dt}mv = \rho \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Qv}{\partial l} \right) dl \quad (37)$$

Težina volumena projicirana na os u smjeru toka

$$-G \sin \alpha = -\rho g A \frac{\partial z_c}{\partial l} dl \quad (38)$$

Normalna tlačna sila sastoji se od sile u poprečnom presjeku  $dN_a$  i normalne tlačne sile  $dN_b$  koja djeluje na omočenu površinu volumena, projicirane na os toka

$$dN_a = \left( p_c A - \frac{\partial p_c A}{\partial l} dl \right) - \left( p_c A + \frac{\partial p_c A}{\partial l} dl \right) = -\frac{\partial p_c A}{\partial l} dl \quad (39)$$

$$dN_b = p_c \frac{\partial A}{\partial l} dl \quad (40)$$

Ukupna normalna tlačna sila se dobije zbrajanjem dvaju prethodnih izraza

$$dN = dN_a + dN_b = -\frac{\partial p_c A}{\partial l} dl + p_c \frac{\partial A}{\partial l} dl \quad (41)$$

$$dN = -A \frac{\partial p_c}{\partial l} dl \quad (42)$$

Projekcija sile trenja na omočenu površinu kontrolnog volumena je u smjeru toka, zbog pretpostavke da su strujnice paralelne s osi tečenja, približno jednaka sljedećem izrazu:

$$-T = -\tau_0 O dl \quad (43)$$

Ukupna sila je jednaka:

$$\sum F = dN - G \sin \alpha - T \quad (44)$$

te je nakon uvođenja jednadžbi (42), (38) i (43) u jednadžbu (44) dobiven izraz:

$$\sum F = -\rho g A \left( \frac{\partial p_c}{\partial l} \frac{1}{\rho g} + \frac{\partial z_c}{\partial l} + \frac{\tau_0}{\rho g R} \right) dl \quad (45)$$

Kad uvrstimo poznate izraze za  $h = z_c + \frac{p_c}{\rho g} = z_0 + y$  i  $I_e = \frac{\tau_0}{\rho g R}$  možemo pisati:

$$\sum F = -\rho g A \left( \frac{\partial h}{\partial l} + I_e \right) dl \quad (46)$$

Konačan izraz zakona očuvanja količine gibanja u kontrolnom volumenu glasi:

$$\rho \left( \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Qv}{\partial l} \right) dl + \rho g A \left( \frac{\partial h}{\partial l} + J_e \right) dl = 0 \quad (47)$$

iz kojeg se izvodi diferencijalni oblik

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Qv}{\partial l} + g A \left( \frac{\partial h}{\partial l} + J_e \right) = 0 \quad (48)$$

Budući da se radi o blago nagnutom koritu, gradijent energije može se zamijeniti izrazom za nagib linije energije:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Qv}{\partial l} + g A \left( \frac{\partial h}{\partial l} + I_e \right) = 0 \quad (49)$$

### 3. MATEMATIČKI MODEL TEČENJA U OTVORENOM KORITU

#### 3.1. UVOD

Za proračun tečenja u dva rukavca Neretve razvijen je matematički model tečenja u otvorenom koritu u mirnom režimu strujanja, koristeći se metodom konačnih elemenata, najpopularnijom i najčešće korištenom numeričkom metodom za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednačbi. Podjela domene na konačne elemente i zapisivanje jednačbi strujanja za svaki element, uz korištenje računala, pruža efektivan način rješavanja piezometarskih stanja i protoka na elementima, a time i na cijeloj domeni proračuna.

#### 3.2. OPIS MODELA

Matematički model je zamišljen kao jednodimenzionalni model. Postavlja se os duž domene proračuna i dijeli se na konačne elemente. Pri analizi problema zanemarena je razlika u gustoći vode i mora tj. problem je monofazan. Naime, moguće je da se u donjem dijelu toka pojavi zaslanjena voda. Međutim, zbog visokih kota dna ustava (-1 m n.m.) vjerojatnost ulaska zaslanjene vode u promatrani sustav je gotovo zanemariva.

Kod jednodimenzionalnih modela postoji jasno izražen dominantan smjer strujanja u kojem su brzine znatno veće od poprečnih. Kod analize strujanja u izduženim kanalima dovoljno je promatrati problem kao jednodimenzionalan jer se zapravo druga dimenzija, u vidu površina poprečnog presjeka kanala i volumetrije koja je pridružena svakom čvoru, uzima u obzir u formulaciji dinamičkih jednačbi strujanja i jednačbi kontinuiteta koje se postavljaju za elemente i čvorove.

Hidrauličko ponašanje sustava otvorenog kanala opisano je jednačbama oscilacija nestišljive tekućine tj. dinamičkom jednačbom tečenja i jednačbom kontinuiteta. Numeričkom proračunu pristupa se direktno iz ta dva zakona, koji izražavaju održanje volumnog protoka i energije u Bernoullijevoj jednačbi u visinskom obliku. [2]

Jednačbe su, u svrhu integracije, transformirane tako da se problem svodi na rješavanje diferencijalnih jednačbi drugog reda za poznate početne i rubne uvjete. Sustav je u svakom stanju i na svakom konačnom elementu opisan s protokom  $Q$  na elementu i piezometarskim visinama  $h$  na uzvodnom i nizvodnom čvoru elementa tj. opisan je sustavom sa tri jednačbe s tri nepoznanice. Konačan sustav svih elemenata sadrži  $n$  jednačbi sa  $n$  nepoznanica.

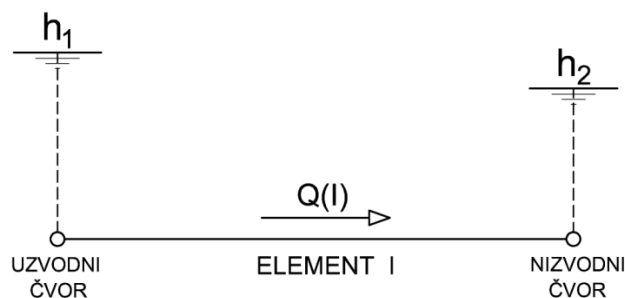
Sustav se rješava Newton-Raphson metodom, pri čemu se dijelovi nelinearnih diferencijalnih jednačbi, koji se ne mogu direktno integrirati, rješavaju primjenom numeričkih metoda

integracije nelinearnih funkcija, u ovom slučaju implicitno-eksplicitnim postupkom integracije (opisano detaljnije u poglavlju 3.3).

### 3.3. FORMULACIJA MATEMATIČKOG MODELA

#### 3.3.1. JEDNADŽBE TEČENJA ZA KONAČNI ELEMENT

Dinamička jednadžba elementa



Slika 10 Konačni element kao dio modela

Konačan element je opisan dinamičkom jednadžbom:

$$h_1 = h_2 \pm \Delta H_e + \frac{L}{g} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (50)$$

Gubitak energije  $\Delta H_e$  za stacionarno tečenje određen je iz člana Manning-Strickler-ove formule za brzinu koji predstavlja nagib linije energije [3]:

$$v = K \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{I_e} \quad (51)$$

gdje je:

$v$  – brzina strujanja u koritu ( $\frac{m}{s}$ )

$K$  – Strickler-ov koeficijent kao mjera glatkosti korita

$R$  – Hidraulički radijus korita – omjer omočene površine poprečnog presjeka i omočenog opsega ( $m$ )

$I_e$  – nagib linije energije

$$I_e = \frac{\Delta H_e}{L} \quad (52)$$

Kad se Manning-Strickler-ova formula uvrsti u formulu za protok dobije se:

$$Q = v \cdot A = K \cdot \frac{A^{\frac{5}{3}}}{O^{\frac{2}{3}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta H_e}{L}} \quad (53)$$

$$Q = K \cdot \frac{A^{\frac{5}{3}}}{O^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{L}} \cdot \sqrt{\Delta H_e} \quad (54)$$

Strickler-ov koeficijent glatkosti, hidraulički radijus i duljina konačnog elementa zajedno opisuju provodljivost konačnog elementa. Kako koeficijent glatkosti ovisi o površini samog korita, a omočeni opseg i omočena površina poprečnog presjeka ovise o piezometarskoj visini, može se reći da je provodljivost u funkciji visine.

$$C(h) = K \cdot \frac{A(h)^{\frac{5}{3}}}{O(h)^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{L}} \quad (55)$$

Provodljivost u sebi sadrži geometrijske karakteristike konačnog elementa, i sadržana je u formulaciji dinamičke jednadžbe, što je jedan od razloga zbog kojeg model možemo promatrati kao jednodimenzionalan.

Konačno se dobije izraz koji definira gubitak energije  $\Delta H_e$  na elementu I:

$$\Delta H_e = \frac{Q^2}{C(h)^2} \quad (56)$$

Uvođenjem izraza za gubitak energije u dinamičku jednadžbu dobije se:

$$h_1 = h_2 \pm \frac{Q^2}{C^2} + \frac{L}{g} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (57)$$

Predznak disipacije energije je pozitivan u smjeru pozitivnog protoka, a negativan u suprotnom smjeru. Gubitak negativnog predznaka sprječava se množenjem stvarne i apsolutne vrijednosti protoka. [4]

$$h_1 = h_2 + \frac{|Q| \cdot Q}{C^2} + \frac{L}{g} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (58)$$

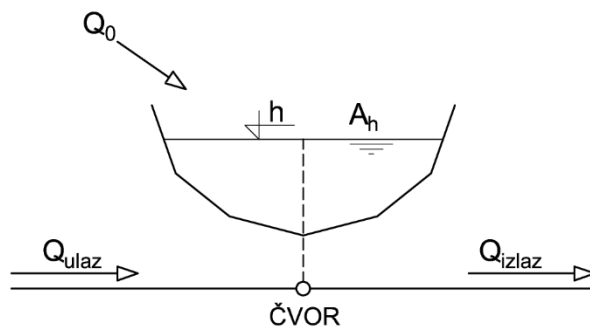
Ako je poznato da je  $v = Q/A$ , dinamička jednadžba se može zapisati kao:

$$h_1 = h_2 + \frac{|Q| \cdot Q}{C^2} + \frac{L}{g \cdot A_{el}} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (59)$$

Kad se derivacija protoka  $dQ/dt$  prebaci na lijevu stranu, a ostatak jednadžbe na desnu dobije se diferencijalna jednadžba protoka na elementu I:

$$\frac{dQ}{dt} = \left( h_1 - h_2 - \frac{|Q| \cdot Q}{C^2} \right) \cdot \frac{g \cdot A_{el}}{L_{el}} \quad (60)$$

### Jednadžba kontinuiteta čvora



Slika 11 Čvor kao dio modela

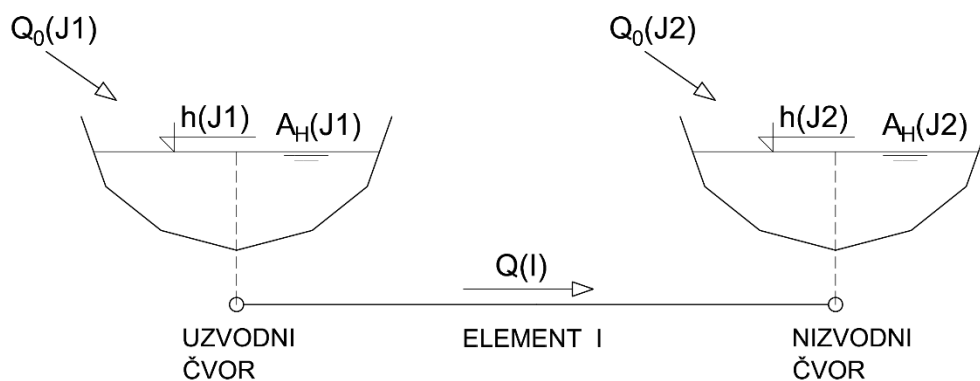
Podizanje ili spuštanje razine vodnog lica, tj. piezometarsko stanje u rezervoaru računa se preko jednadžbe kontinuiteta, što je zapravo zakon očuvanja mase zapisan preko volumetrijskog protoka. Zakon očuvanja nalaže da je ukupna promjena volumena vode u jedinici vremena, unutar rezervoara, jednaka volumenu vode koji uđe u rezervoar minus volumen koji izađe (Slika 11).

Generalni oblik jednadžbe kontinuiteta za rezervoar određenog volumena glasi:

$$\frac{dh}{dt} \cdot A_h = Q_{ulaz} - Q_{izlaz} \pm Q_0 \quad (61)$$

gdje je lijeva strana jednadžbe zapravo  $v \cdot A_{horizontalno}$ , što predstavlja akumuliranje volumena u jedinici vremena unutar rezervoara.

Model je zamišljen na način da se umjesto pisanja cijele jednadžbe kontinuiteta za svaki čvor, uz dinamičke jednadžbe elemenata, najprije zapisuje samo dio jednadžbe kontinuiteta koji sadrži protok u elementu, za uzvodni i nizvodni čvor elementa I (Slika 12). Nakon toga se za svaki čvor zapisuje dio jednadžbe kontinuiteta koji sadrži vanjsko prihranjivanje.



Slika 12 Uzvodni i nizvodni čvor elementa I

Takav način rješavanja sustava pruža mogućnost lokalnog izračuna količine protoka, za svaki element, koji ulazi u nizvodni čvor i izlazi iz uzvodnog čvora. Na taj se način mogu direktno modelirati sustavi koji u jednom čvoru imaju više od dva elementa. U protivnom, ako se u model ide sa cijelom jednadžbom kontinuiteta, prethodno je potrebno definirati tablicu veza svih čvorova i elemenata.

Pišu se jednadžbe kontinuiteta za uzvodni i nizvodni čvor:

$$\frac{dh(J1)}{dt} \cdot A_h(J1) = -Q(I) \pm Q_0(J1) \quad (62)$$

$$\frac{dh(J2)}{dt} \cdot A_h(J2) = Q(I) \pm Q_0(J2) \quad (63)$$

Jednadžbe se razdijele na dio s doprinosima i dio vanjskih prihranjivanja gdje je doprinos elementa I uzvodnom čvoru u jednadžbi kontinuiteta

$$DOPRINOS^- = \frac{dh(J1)}{dt} \cdot A_h(J1) = -Q(I) \quad (64)$$

a doprinos elementa I nizvodnom elementu u jednadžbi kontinuiteta

$$DOPRINOS^+ = \frac{dh(J1)}{dt} \cdot A_h(J1) = Q(I) \quad (65)$$

Dio jednadžbi koji predstavlja prihranjivanje na uzvodni i nizvodni čvor je jednak. U nastavku će se prihranjivanje pisati kao pozitivno, U slučaju negativnog prihranjivanja tj. crpljenja protok će se uvrstiti kao negativan (zakon mijenjanja protoka prihranjivanja  $Q_0$  je zadan u svakom vremenskom koraku i nije nepoznanica).

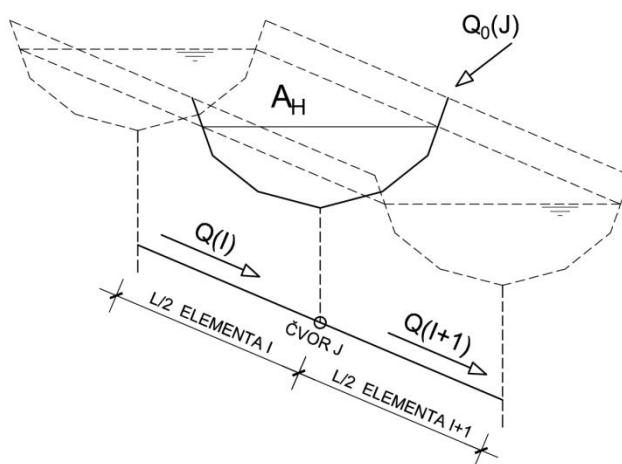
$$\frac{dh(J1)}{dt} \cdot A_h(J1) = Q_0(J1) \quad (66)$$

$$\frac{dh(J2)}{dt} \cdot A_h(J2) = Q_0(J2) \quad (67)$$

Konačan oblik diferencijalnih jednažbi za uzvodni i nizvodni čvor

$$\frac{dh(J1)}{dt} = \frac{-Q(I) \pm Q_0(J1)}{A_h(J1)} \quad (68)$$

$$\frac{dh(J2)}{dt} = \frac{-Q(I) \pm Q_0(J2)}{A_h(J2)} \quad (69)$$



Slika 13 Raspodjela volumena elemenata na čvor

Iz skice (Slika 13) se može vidjeti da je čvor točka, a ne rezervoar nekog volumena. Čvoru se dodijeli volumen sa konačnih elemenata, i to pola volumena sa uzvodnog elementa te pola volumena sa nizvodnog elementa. Na taj je način za svaki čvor definirana volumetrija i samim time horizontalna površina vodnog lica.



### 3.3.2. INTEGRACIJA DIFERENCIJALNIH JEDNADŽBI

Sustav jednadžbi se integrira u nekom konačnom vremenskom intervalu  $[t^k, t^{k+1}]$ . Cjelovito stanje sustava je poznato na početku intervala  $t = t^k$ , a na kraju intervala kad je  $t = t^{k+1}$  se proračunava novo stanje sustava. Oznake  $k$  i  $k + 1$ , gdje  $k = 1, 2, 3, \dots, n$  označavaju stanje sustava u pojedinom trenutku.

Integralni oblik sustava jednadžbi:

- dinamička jednadžba elementa  $I$

$$\int_k^{k+1} dQ = \frac{g \cdot A_{el}}{L_{el}} \cdot \int_k^{k+1} \left( h(J1) - h(J2) - \frac{|Q| \cdot Q}{C^2} \right) \cdot dt \quad (70)$$

- jednadžbe kontinuiteta uzvodnog i nizvodnog čvora elementa  $I$

$$\int_k^{k+1} dh(J1) = \int_k^{k+1} \left( \frac{-Q(I) \pm Q_0(J1)}{A_h(J1)} \right) dt \quad (71)$$

$$\int_k^{k+1} dh(J2) = \int_k^{k+1} \left( \frac{Q(I) \pm Q_0(J2)}{A_h(J2)} \right) dt \quad (72)$$

Nakon integracija lijeva strane jednadžbi dobije se

$$Q^{k+1} = Q^k + \frac{g \cdot A_{el}}{L_{el}} \cdot \int_k^{k+1} \left( h_{uzv} - h_{niz} - \frac{|Q| \cdot Q}{C^2} \right) \cdot dt \quad (73)$$

$$h(J1)^{k+1} = h(J1)^k + \int_k^{k+1} \left( \frac{-Q(I) \pm Q_0(J1)}{A_h(J1)} \right) dt \quad (74)$$

$$h(J2)^{k+1} = h(J2)^k + \int_k^{k+1} \left( \frac{-Q(I) \pm Q_0(J2)}{A_h(J2)} \right) dt \quad (75)$$

Desna strana jednadžbi se ne može direktno integrirati zbog složenih pod-integralnih funkcija. Za kraće vremenske intervale možemo primijeniti neke od metoda numeričke integracije i dovoljno dobro izračunati integrale.

U ovoj formulaciji je korišten implicitno-eksplicitan postupak tj. mješoviti postupak.

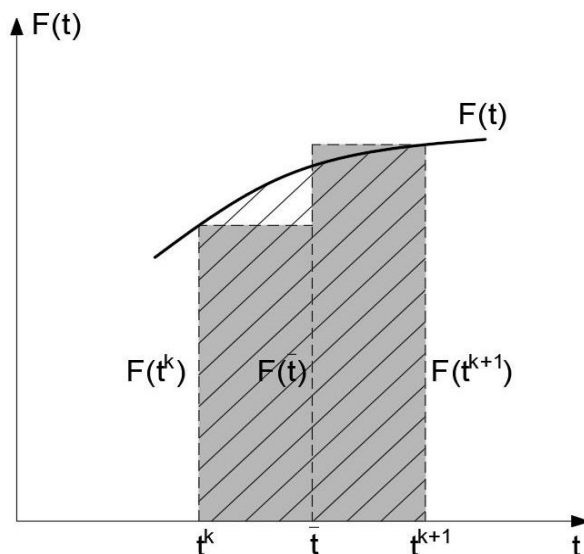
#### Mješovita numerička integracija

Korištenje mješovitog postupka objasniti će se na primjeru jednadžbe:

$$\frac{dy}{dt} = F(t) \quad (76)$$

Ako separiramo varijable i integriramo funkciju u vremenskom intervalu  $[t^k, t^{k+1}]$  dobit ćemo jednadžbu:

$$y^{k+1} = y^k + \int_k^{k+1} F(t)dt \quad (77)$$



Slika 14 Numerička aproksimacija integrala funkcije  $F(t)$

Integral funkcije  $F(t)$  predstavlja površinu ispod krivulje u intervalu  $[t^k, t^{k+1}]$ , te se aproksimira pravokutnim površinama (Slika 14).

Po teoremu o srednjoj vrijednosti integrala može se napisati da je:

$$y^{k+1} - y^k = F(\tilde{t}) \cdot (t^{k+1} - t^k) \quad (78)$$

gdje srednji vremenski interval uzima vrijednost  $t^k \leq \tilde{t} \leq t^{k+1}$ .

Funkcijska vrijednost  $F(\tilde{t})$  je nepoznata, ali se može aproksimirati s površinama dvaju pravokutnika, pa je konačna aproksimacija integrala:

$$y^{k+1} - y^k = (1 - \theta) \cdot F(t^k) \cdot (t^{k+1} - t^k) + \theta \cdot F(t^{k+1}) \cdot (t^{k+1} - t^k) \quad (79)$$

Vrijednost člana jednadžbe  $F(t^k) \cdot (t^{k+1} - t^k)$  je eksplicitni dio aproksimacije, jer se aproksimira na temelju poznatog stanja na početku vremenskog intervala, a vrijednost  $F(t^{k+1}) \cdot (t^{k+1} - t^k)$  je implicitni dio jer se aproksimira na temelju nepoznatog stanja na kraju vremenskog intervala.

Parametar parcijalne integracije  $\theta$  zapravo ima funkciju raspodjele eksplicitne i implicitne vrijednosti.  $\theta$  uzima vrijednost  $0 \leq \theta \leq 1$ , i eksperimentalno se pokazalo da se najbolji rezultati dobiju s vrijednosti  $\theta = 0,55$ .

Nakon primjene mješovite metode na sustav jednadžbi dobije se konačan oblik jednadžbi na konačnom elementu i za konačan vremenski period.

- dinamička jednadžba za  $I$ -ti element:

$$Q(I)^{k+1} = Q(I)^k + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \left( h(J1)^k - h(J2)^k - \frac{|Q(I)^k| \cdot Q(I)^k}{C_k^2} \right) \cdot \frac{g \cdot A_{el}^k}{L_{el}} + \theta \cdot \Delta t \cdot \left( h(J1)^{k+1} - h(J2)^{k+1} - \frac{|Q(I)^{k+1}| \cdot Q(I)^{k+1}}{C_{k+1}^2} \right) \cdot \frac{g \cdot A_{el}^{k+1}}{L_{el}} \quad (80)$$

gdje je:

$Q(I)^k$  – protok na elementu I u trenutku  $k$   $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$Q(I)^{k+1}$  – protok na elementu I u trenutku  $k + 1$   $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

$h(J1)^k$  – piezometarsko stanje u uzvodnom čvoru u trenutku  $k$  (m n. m.)

$h(J1)^{k+1}$  – piezometarsko stanje u uzvodnom čvoru u trenutku  $k + 1$  (m n. m.)

$h(J2)^k$  – piezometarsko stanje u nizvodnom čvoru u trenutku  $k$  (m n. m.)

$h(J2)^{k+1}$  – piezometarsko stanje u nizvodnom čvoru u trenutku  $k + 1$  (m n. m.)

$C_k$  – provodljivost elementa za srednje piezometarsko stanje na elementu u trenutku  $k$

$C_{k+1}$  – provodljivost elementa za srednje piezometarsko stanje na elementu u trenutku  $k + 1$

$A_{el}^k$  – površina poprečnog presjeka elementa u trenutku  $k$  ( $m^2$ )

$A_{el}^{k+1}$  – površina poprečnog presjeka elementa u trenutku  $k + 1$  ( $m^2$ )

$L$  – duljina elementa (m)

$g$  – ubrzanje sile teže  $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

$\theta$  – parametar numeričke integracije

$\Delta t$  – vremenski korak (s)

- jednadžbe kontinuiteta uzvodnog i nizvodnog čvora elementa  $I$

$$h(J1)^{k+1} = h(J1)^k + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \left( \frac{Q_0(J1)^k - Q(I)^k}{A_h^k(J1)} \right) + \theta \cdot \Delta t \cdot \left( \frac{Q_0(J1)^{k+1} - Q(I)^{k+1}}{A_h^{k+1}(J1)} \right) \quad (81)$$

$$h(J2)^{k+1} = h(J2)^k + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \left( \frac{Q_0(J2)^k - Q(I)^k}{A_h^k(J2)} \right) + \theta \cdot \Delta t \cdot \left( \frac{Q_0(J2)^{k+1} - Q(I)^{k+1}}{A_h^{k+1}(J2)} \right) \quad (82)$$

gdje je:

- $Q(I)^k$  – protok na elementu I u trenutku  $k$   $\left(\frac{m^3}{s}\right)$   
 $Q(I)^{k+1}$  – protok na elementu I u trenutku  $k + 1$   $\left(\frac{m^3}{s}\right)$   
 $h(J1)^k$  – piezometarsko stanje u uzvodnom čvoru u trenutku  $k$  (m n. m.)  
 $h(J1)^{k+1}$  – piezometarsko stanje u uzvodnom čvoru u trenutku  $k + 1$  (m n. m.)  
 $h(J2)^k$  – piezometarsko stanje u uzvodnom čvoru u trenutku  $k$  (m n. m.)  
 $h(J2)^{k+1}$  – piezometarsko stanje u uzvodnom čvoru u trenutku  $k + 1$  (m n. m.)  
 $A_h^k(J1)$  – horizontalna površina u uzvodnom čvoru u trenutku  $k$  ( $m^2$ )  
 $A_h^{k+1}(J1)$  – horizontalna površina u uzvodnom čvoru u trenutku  $k + 1$  ( $m^2$ )  
 $A_h^k(J2)$  – horizontalna površina u nizvodnom čvoru u trenutku  $k$  ( $m^2$ )  
 $A_h^{k+1}(J2)$  – horizontalna površina u nizvodnom čvoru u trenutku  $k + 1$  ( $m^2$ )  
 $\theta$  – parametar numeričke integracije  
 $\Delta t$  – vremenski korak (s)

Dijelovi čvornih jednadžbi koji se odnose na doprinose i prihranjivanje nakon primjene metode mješovite integracije

- uzvodni čvor elementa I

$$\begin{aligned}
 \text{DOPRINOS}^- \rightarrow h(J1)^{k+1} = h(J1)^k + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{-Q(I)^k}{A_h^k(J1)} + \\
 + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{-Q(I)^{k+1}}{A_h^{k+1}(J1)}
 \end{aligned} \tag{83}$$

$$\begin{aligned}
 \text{PRIHRANJIVANJE} \rightarrow h(J1)^{k+1} = h(J1)^k + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_0(J1)^k}{A_h^k(J1)} + \\
 + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_0(J1)^{k+1}}{A_h^{k+1}(J1)}
 \end{aligned} \tag{84}$$

- nizvodni čvor elementa I

$$\begin{aligned}
 \text{DOPRINOS}^+ \rightarrow h(J2)^{k+1} = h(J2)^k + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{-Q(I)^k}{A_h^k(J2)} + \\
 + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{-Q(I)^{k+1}}{A_h^{k+1}(J2)}
 \end{aligned} \tag{85}$$

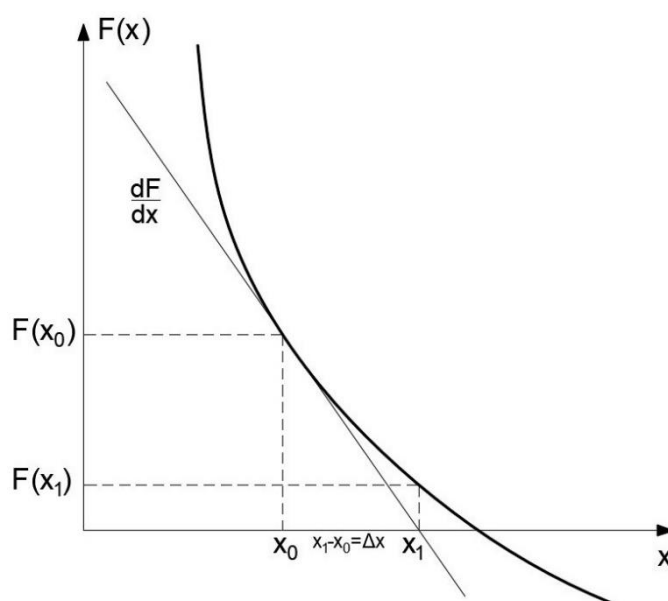
$$\begin{aligned}
 \text{PRIHRANJIVANJE} \rightarrow h(J2)^{k+1} = h(J2)^k + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_0(J2)^k}{A_h^k(J2)} + \\
 + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_0(J2)^{k+1}}{A_h^{k+1}(J2)}
 \end{aligned} \tag{86}$$

### 3.4. GLOBALNI SUSTAV JEDNADŽBI

#### 3.4.1. NEWTON-RAPHSON METODA RJEŠAVANJA SUSTAVA NELINEARNIH JEDNADŽBI

Newton-ova metoda se često koristi za numeričko rješavanje nelinearnih jednadžbi, a temelji se na korištenju linearne aproksimacije za rješavanje jednadžbi. [4]

Neka je  $F(x)$  neka opća funkcija i neka je  $r$  rješenje za  $F(x) = 0$ . Prvi korak u nalaženju rješenja  $r$  je pretpostavka rješenja  $x_0$ . Iz prve pretpostavke ćemo naći drugu pretpostavku  $x_1$  koja je bliža rješenju  $r$ , i tako iterativno dok razlika pretpostavke postane približno jednaka:  $x_n - r \approx 0$ .



Slika 15 Graf funkcije  $F(x)$

Za pretpostavljenu vrijednost  $x_0$  provuče se tangenta na graf  $F(x)$ ; na mjestu gdje tangenta siječe os  $x$  dobili smo pretpostavku  $x_1$  za sljedeću iteraciju. Postupak se nastavlja dok se ne nađe točka u kojoj graf funkcije  $F(x)$  siječe os  $x$ , te samim time rješenje  $F(x) = 0$ .

Nagib tangente je zapravo derivacija funkcije u točki za koju je tangenta provučena.

$$\frac{dF}{dx} = \frac{F(x_0)}{x_1 - x_0} \quad (87)$$

$$x_1 = x_0 - \frac{F(x_0)}{\frac{dF(x)}{dx}} \quad (88)$$

Općenito možemo zapisati:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{F(x_n)}{\frac{dF(x)}{dx}} \quad (89)$$

$$\frac{dF}{dx} \cdot \Delta x = -F(x) \quad (90)$$

gdje je  $\Delta x = x_{n+1} - x_n$

Postupak se ponavlja iterativno dok ne dobije  $\Delta x \approx 0$ .

### 3.4.2. SLAGANJE GLOBALNOG SUSTAVA JEDNADŽBI

Prethodno izvedenu dinamičku jednadžbu (80) i jednadžbe kontinuiteta (81) i (82) treba preformulirati da bi mogli koristiti Newton-ovu metodu rješavanja nelinearnih sustava.

Sustav se sastoji od  $(nel + ncvor)$  jednadžbi sa  $(nel + ncvor)$  nepoznanica, gdje je  $nel$  broj elemenata, a  $ncvor$  broj čvorova. Nepoznanice na svakom  $I$  elementu su vrijednosti protoka i piezometarskih stanja na uzvodnom i nizvodnom čvoru, na kraju vremenskog intervala:  $Q(I)^{k+1}$ ,  $h(J1)^{k+1}$ ,  $h(J2)^{k+1}$ .

Prvi korak je prebacivanje svih članova na jednu stranu i izjednačavanje s nulom, te nalaženje derivacija funkcije po sve tri nepoznate varijable.

Postavlja se dinamička jednadžba za  $I$ -ti element:

$$F(I) = Q(I)^{k+1} - Q(I)^k - (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \left( h(J1)^k - h(J2)^k - \frac{|Q(I)^k| \cdot Q(I)^k}{C_k^2} \right) \cdot \frac{g \cdot A_{el}^k}{L_{el}} - \theta \cdot \Delta t \cdot \left( h(J1)^{k+1} - h(J2)^{k+1} - \frac{|Q(I)^{k+1}| \cdot Q(I)^{k+1}}{C_{k+1}^2} \right) \cdot \frac{g \cdot A_{el}^{k+1}}{L_{el}} \quad (91)$$

$$\frac{\partial F(I)}{\partial Q(I)^{k+1}} = 1,0 + \theta \cdot \frac{2 \cdot Q(I)^{k+1}}{C(I)_{k+1}^2} \cdot \frac{g \cdot A_{el}^{k+1}}{L_{el}} \cdot \Delta t \quad (92)$$

$$\frac{\partial F(I)}{\partial h(J1)^{k+1}} = -\theta \cdot \frac{g \cdot A_{el}^{k+1}}{L_{el}} \cdot \Delta t \quad (93)$$

$$\frac{\partial F(I)}{\partial h(J2)^{k+1}} = \theta \cdot \frac{g \cdot A_{el}^{k+1}}{L_{el}} \cdot \Delta t \quad (94)$$

Nakon dinamičke jednadžbe najprije postavljamo dio jednadžbe kontinuiteta koji se odnosi na doprinose protoka za uzvodni i nizvodni čvor iz elementa  $I$ :

$$F(J1) = (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{Q(I)^k}{A_h^k(J1)} + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{Q(I)^{k+1}}{A_h^{k+1}(J1)} \quad (95)$$

$$F(J2) = -(1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{Q(I)^k}{A_h^k(J1)} - \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{Q(I)^{k+1}}{A_h^{k+1}(J1)} \quad (96)$$

Derivacije čvornih jednadžbi po nepoznatim varijablama:

$$\frac{\partial F(J1)}{\partial Q(I)^{k+1}} = \frac{\theta \cdot \Delta t}{A_h^{k+1}(J1)} \quad (97)$$

$$\frac{\partial F(J1)}{\partial h(J1)^{k+1}} = 1,0 \quad (98)$$

$$\frac{\partial F(J1)}{\partial h(J2)^{k+1}} = 0,0 \quad (99)$$

$$\frac{\partial F(J2)}{\partial Q(I)^{k+1}} = -\frac{\theta \cdot \Delta t}{A_h^{k+1}(J2)} \quad (100)$$

$$\frac{\partial F(J2)}{\partial h(J1)^{k+1}} = 0,0 \quad (101)$$

$$\frac{\partial F(J2)}{\partial h(J2)^{k+1}} = 1,0 \quad (102)$$

Lokalni sustav jednadžbi elementa  $I$  zapisan Newton-ovom metodom:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F(I)}{\partial Q(I)^{k+1}} & \frac{\partial F(I)}{\partial h(J1)^{k+1}} & \frac{\partial F(I)}{\partial h(J2)^{k+1}} \\ \frac{\partial F(J1)}{\partial Q(I)^{k+1}} & 1,0 & 0,0 \\ \frac{\partial F(J2)}{\partial Q(I)^{k+1}} & 0,0 & 1,0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta Q(I)^{k+1} \\ \Delta h(J1)^{k+1} \\ \Delta h(J2)^{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F(I) \\ -F(J1) \\ -F(J2) \end{bmatrix} \quad (103)$$

Shema slaganja članova u matricu globalnog sustava:

		Protoci		Piezometarske visine				
		$I - stupac$		$J3 - stupac$	$J4 - stupac$			
Elementne jednadžbe	$I - redak$	...	$\frac{\partial F(I)}{\partial Q(I)^{k+1}}$	...	...	$\frac{\partial F(I)}{\partial h(J1)^{k+1}}$	$\frac{\partial F(I)}{\partial h(J2)^{k+1}}$	...
			$\vdots$			$\vdots$	$\vdots$	
				$\vdots$			$\vdots$	$\vdots$
Čvorne jednadžbe	$J3 - stupac$	...	$\frac{\partial F(J1)}{\partial Q(I)^{k+1}}$	...	...	1,0	...	...
	$J4 - stupac$	...	$\frac{\partial F(J2)}{\partial Q(I)^{k+1}}$	...	...	...	1,0	...
			$\vdots$				$\vdots$	$\vdots$

$$I = 1, \dots, nel, \quad J3 = J1 + nel, \quad J4 = J2 + nel$$

$$J1 = 1, \dots, ncvor, \quad J2 = 2, \dots, ncvor$$

Sustav jednačbi po Newton-ovoj metodi može se zapisati u matičnom obliku:

$$[FGLOB] \cdot [\Delta] = [F] \quad (104)$$

-  $[FGLOB]$  predstavlja globalnu matricu derivacija dinamičkih i čvornih jednačbi:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F(1)}{\partial Q(1)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(1)}{\partial Q(I)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(1)}{\partial Q(nel)^{k+1}} & \frac{\partial F(1)}{\partial h(1)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(1)}{\partial h(J)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(1)}{\partial h(ncvor)^{k+1}} \\ \frac{\partial F(2)}{\partial Q(1)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(2)}{\partial Q(I)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(2)}{\partial Q(nel)^{k+1}} & \frac{\partial F(2)}{\partial h(1)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(2)}{\partial h(J)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(2)}{\partial h(ncvor)^{k+1}} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F(I)}{\partial Q(1)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(I)}{\partial Q(I)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(I)}{\partial Q(nel)^{k+1}} & \frac{\partial F(I)}{\partial h(1)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(I)}{\partial h(J)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(I)}{\partial h(ncvor)^{k+1}} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial F(nel)}{\partial Q(1)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(nel)}{\partial Q(I)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(nel)}{\partial Q(nel)^{k+1}} & \frac{\partial F(nel)}{\partial h(1)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(nel)}{\partial h(J)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(nel)}{\partial h(ncvor)^{k+1}} \\ \frac{\partial F(JJ)}{\partial Q(1)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(JJ)}{\partial Q(I)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(JJ)}{\partial Q(nel)^{k+1}} & \frac{\partial F(JJ)}{\partial h(1)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(JJ)}{\partial h(J)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(JJ)}{\partial h(ncvor)^{k+1}} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F(*)}{\partial Q(1)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(*)}{\partial Q(I)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(*)}{\partial Q(nel)^{k+1}} & \frac{\partial F(*)}{\partial h(1)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(*)}{\partial h(J)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(*)}{\partial h(ncvor)^{k+1}} \end{bmatrix}$$

$$(*) - (nel + ncvor) \quad J = 1, \dots, ncvor \quad JJ = nel + J$$

-  $[\Delta]$  predstavlja vektor prirasta protoka  $\Delta Q(I)^{k+1}$  i piezometarskih visina  $\Delta h(J)^{k+1}$ , a  $[F]$  vektor desne strane sustava

$$[\Delta] = \begin{bmatrix} \Delta Q(1)^{k+1} \\ \Delta Q(2)^{k+1} \\ \vdots \\ \Delta Q(I)^{k+1} \\ \vdots \\ \Delta Q(nel)^{k+1} \\ \Delta h(1)^{k+1} \\ \vdots \\ \Delta h(J)^{k+1} \\ \vdots \\ \Delta h(ncvor)^{k+1} \end{bmatrix} \quad [F] = \begin{bmatrix} -F(1) \\ -F(2) \\ \vdots \\ -F(I) \\ \vdots \\ -F(nel) \\ -F(JJ) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ -F(nel + ncvor) \end{bmatrix}$$



Bitno je napomenuti da treba paziti pri ispunjavanju vektora desne strane sustava kod čvornih jednažbi. Naime, nizvodni čvor  $J2$  promatranog elementa  $I$  će biti na mjestu uzvodnog čvora  $J1$  za sljedeći element  $I + 1$ . Ono što je bio pozitivni doprinos elementa  $I$  nizvodnom čvoru sad će biti negativni doprinos elementa  $I + 1$ .

Primjer vektora desne strane za čvorne jednažbe elemenata  $I = 1$  i  $I = 2$ :

$$\begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F(nel + 1)}{\partial Q(1)^{k+1}} & & \dots \\ \frac{\partial F(nel + 2)}{\partial Q(1)^{k+1}} & \frac{\partial F(nel + 2)}{\partial Q(2)^{k+1}} & \dots \\ \vdots & \frac{\partial F(nel + 3)}{\partial Q(2)^{k+1}} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta h(1)^{k+1} \\ \Delta h(2)^{k+1} \\ \Delta h(3)^{k+1} \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ -F(nel + 1) \\ -(F(nel + 2) + F(nel + 1)) \\ -(F(nel + 3) + F(nel + 2)) \\ \vdots \end{bmatrix}$$

Nakon što su derivacije jednažbi izračunate i posložene u globalnu matricu sustava, prije zadavanja rubnih uvjeta, za sve čvorne jednažbe treba uvrstiti dio jednažbe kontinuiteta koji se odnosi na vanjsko prihranjivanje čvora.

$$F(JJ)_{konačno} = F(JJ)_{prethodno} + h(J)^{k+1} - h(J)^k + (1 - \theta) \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_0(J)^k}{A_h^k(J)} + \theta \cdot \Delta t \cdot \frac{Q_0(J)^{k+1}}{A_h^{k+1}(J)} \quad (105)$$

gdje je:

$$J = 1, \dots, n_{cvor}$$

$$JJ = nel + J$$

Konačno je složen sustav za proračun prirasta protoka po svim elementima i prirasta vodostaja po svim čvorovima:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial F(1)}{\partial Q(1)^{k+1}} \cdot \Delta Q(1)^{k+1} + \dots + \frac{\partial F(1)}{\partial Q(nel)^{k+1}} \cdot \Delta Q(1)^{k+1} + \frac{\partial F(1)}{\partial h(1)^{k+1}} \cdot \Delta h(1)^{k+1} + \dots + \frac{\partial F(1)}{\partial h(ncvor)^{k+1}} = \\ & = -F(1) \\ & \frac{\partial F(2)}{\partial Q(1)^{k+1}} \cdot \Delta Q(1)^{k+1} + \dots + \frac{\partial F(2)}{\partial Q(nel)^{k+1}} \cdot \Delta Q(1)^{k+1} + \frac{\partial F(2)}{\partial h(1)^{k+1}} \cdot \Delta h(1)^{k+1} + \dots + \frac{\partial F(2)}{\partial h(ncvor)^{k+1}} = \\ & = -F(2) \\ & \frac{\partial F(3)}{\partial Q(1)^{k+1}} \cdot \Delta Q(1)^{k+1} + \dots + \frac{\partial F(3)}{\partial Q(nel)^{k+1}} \cdot \Delta Q(1)^{k+1} + \frac{\partial F(3)}{\partial h(1)^{k+1}} \cdot \Delta h(1)^{k+1} + \dots + \frac{\partial F(3)}{\partial h(ncvor)^{k+1}} = \\ & = -F(3) \\ & \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial F(nel + ncvor)}{\partial Q(1)^{k+1}} \cdot \Delta Q(1)^{k+1} + \dots + \frac{\partial F(nel + ncvor)}{\partial Q(nel)^{k+1}} \cdot \Delta Q(1)^{k+1} + \frac{\partial F(nel + ncvor)}{\partial h(1)^{k+1}} \cdot \Delta h(1)^{k+1} + \dots \\ & + \frac{\partial F(nel + ncvor)}{\partial h(nel + ncvor)^{k+1}} = -F(nel + ncvor) \end{aligned}$$

Parcijalne derivacije dinamičke jednadžbe  $F(I = 1, \dots, nel)$  elemenata  $I = 1, \dots, nel$  po protocima drugih elemenata  $Q(I \neq 1)$  i po vodostaju čvorova koji ne pripadaju tom elementu su jednake 0. Isto tako, parcijalne derivacije čvornih jednadžbi  $F(JJ = nel + J)$  po vodostaju različitog čvora  $h(J)$ , su jednake 0.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F(1)}{\partial Q(1)^{k+1}} & 0,0 & 0,0 & \dots & \frac{\partial F(1)}{\partial h(1)^{k+1}} & \frac{\partial F(1)}{\partial h(2)^{k+1}} & 0,0 & 0,0 & \dots \\ 0,0 & \frac{\partial F(2)}{\partial Q(I)^{k+1}} & 0,0 & \dots & 0,0 & \frac{\partial F(2)}{\partial h(2)^{k+1}} & \dots & \frac{\partial F(2)}{\partial h(3)^{k+1}} & 0,0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F(nel + 1)}{\partial Q(1)^{k+1}} & 0,0 & 0,0 & \dots & 1,0 & 0,0 & 0,0 & 0,0 & \dots \\ \frac{\partial F(nel + 2)}{\partial Q(1)^{k+1}} & \frac{\partial F(nel + 2)}{\partial Q(2)^{k+1}} & 0,0 & \dots & 0,0 & 1,0 & 0,0 & 0,0 & \dots \\ 0,0 & \frac{\partial F(nel + 3)}{\partial Q(2)^{k+1}} & \frac{\partial F(nel + 3)}{\partial Q(3)^{k+1}} & \dots & 0,0 & 0,0 & 1,0 & 0,0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$



## 4. PRORAČUN

Cilj matematičke analize strujanja u rukavcima Stare gornje i donje Neretve je određivanje vremena u kojem će doći do potpune izmjene vode u rukavcima, odnosno potrebnog osvježavanja sustava. Taj podatak se dobije iz analize piezometarskih stanja u rukavcu, protoka i brzine strujanja koji će se ostvariti za dane rubne uvijete.

Veza između rukavaca je ostvarena na dva načina, otvorenim kanalom i s cijevi pod tlakom.

### 4.1. ULAZNI PODATCI

#### 4.1.1. GEOMETRIJSKE KARAKTERESTIKE USTAVE

Definirane su dvije ustave, jedna na ulazu u Staru gornju Neretvu te druga na izlazu iz Stare donje Neretve. Uloga ustava je kontrola ulaska vode iz glavnog toka Neretve u sustav rukavaca. Matematički svaka ustava je definirana kao jedan element. Za određivanje promjene vodnog lica na ulazu i izlazu iz elementa ustave potrebno je izračunati vodno lice u elementu. Vodno lice je izračunato preko integracije diferencijalne jednadžbe vodnog lica. Proračun je izvršen u programu Excel, gdje je za 25 piezometarskih visina određena promjena vodnog lica te je prema formuli određena provodljivost za svaku razinu.

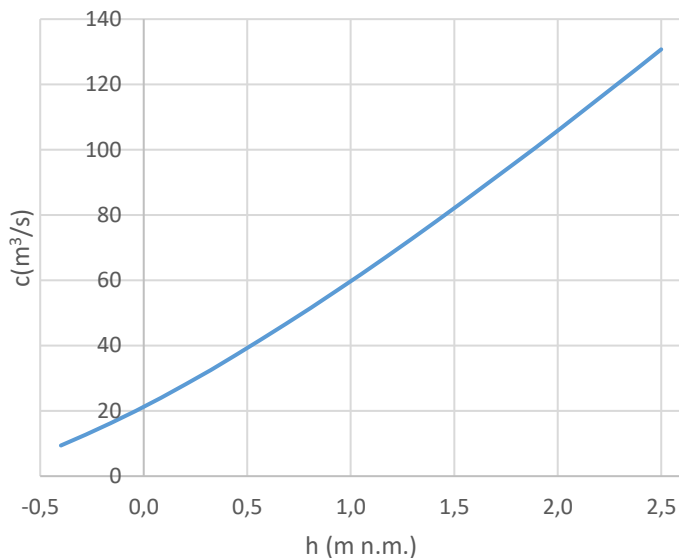
$$C(h) = K \cdot \frac{A(h)^{\frac{5}{3}}}{O(h)^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{L}}$$

Obje ustave imaju kotu dna -1 m n.m. te pravokutan poprečni presjek na svakom segmentu. Tlocrtno se širina poprečnog presjeka mijenja na način da su na ulazu i izlazu nešto veće dimenzije, nego u sredini elementa. Detaljan prikaz ustava je prikazan je u prilogima Prilog 4 i Prilog 5.

Odnos vodostaja, površine poprečnog presjeka i provodljivosti je prikazan u tablicama: Tablica 1 i Tablica 2, a grafički prikaz odnosa vodostaja i provodljivosti na slikama: Slika 16 i Slika 17 za Sjevernu i Južnu ustavu.

Tablica 1 Odnos vodostaja, površine poprečnog presjeka i provodljivosti za Sjevernu ustavu

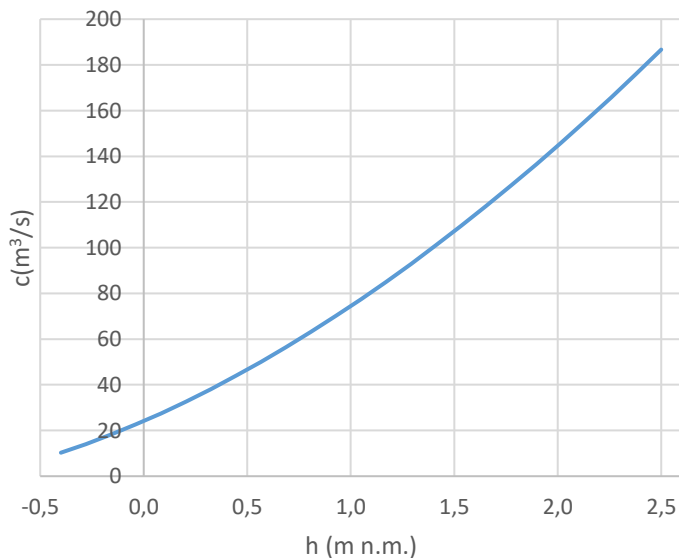
h (m)	A (m <sup>2</sup> )	C (m <sup>3</sup> /s)
-0,4000	3,0000	9,3970
-0,2792	3,6042	12,6951
-0,1583	4,2083	16,2400
-0,0375	4,8125	20,0192
0,0833	5,4167	24,0142
0,2042	6,0208	28,2070
0,3250	6,6250	32,5808
0,4458	7,2292	37,1206
0,5667	7,8333	41,8130
0,6875	8,4375	46,6460
0,8083	9,0417	51,6091
0,9292	9,6458	56,6926
1,0500	10,2500	61,8881
1,1708	10,8542	67,1878
1,2917	11,4583	72,5846
1,4125	12,0625	78,0724
1,5333	12,6667	83,6453
1,6542	13,2708	89,2980
1,7750	13,8750	95,0257
1,8958	14,4792	100,8241
2,0167	15,0833	106,6889
2,1375	15,6875	112,6166
2,2583	16,2917	118,6036
2,3792	16,8958	124,6468
2,5000	17,5000	130,7431



Slika 16. Odnos vodostaja i provodljivosti za Sjevernu ustavu

Tablica 2 Odnos vodostaja, površine poprečnog presjeka i provodljivosti za Južnu ustavu

h (m)	A (m <sup>2</sup> )	C (m <sup>3</sup> /s)
-0,4000	3,0000	10,2969
-0,2792	3,6042	14,0520
-0,1583	4,2083	18,1703
-0,0375	4,8125	22,6472
0,0833	5,4167	27,4724
0,2042	6,0208	32,6345
0,3250	6,6250	38,1234
0,4458	7,2292	43,9301
0,5667	7,8333	50,0467
0,6875	8,4375	56,4665
0,8083	9,0417	63,1835
0,9292	9,6458	70,1929
1,0500	10,2500	77,4904
1,1708	10,8542	85,0724
1,2917	11,4583	92,9358
1,4125	12,0625	101,0780
1,5333	12,6667	109,4971
1,6542	13,2708	118,1913
1,7750	13,8750	127,1593
1,8958	14,4792	136,4002
2,0167	15,0833	145,9133
2,1375	15,6875	155,6983
2,2583	16,2917	165,7551
2,3792	16,8958	176,0838
2,5000	17,5000	186,6849



Slika 17. Odnos vodostaja i provodljivosti za Sjevernu ustavu

#### 4.1.2. GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE CIJEVI

U matematičkom modelu cijev, kao i ustave, je promatrana kao jedan element. Provodljivost cijevi izračunata je prema izrazu:

$$C(h) = \frac{Q}{\sqrt{\Delta h}} \quad (110)$$

Ukupni pad vodnog lica određen je prema formuli

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \left( \xi_u + \lambda \frac{l}{D} + \alpha \right) \frac{v^2}{2g} \quad (111)$$

gdje je

- $\xi_u$  - koeficijent lokalnog gubitka energije na ulazu u cjevovodu
- $\lambda$  - koeficijent otpora trenja
- $l$  [m] - dužina cjevovoda
- $D$  [m] - promjer cijevi
- $\alpha$  - koeficijent kinetičke energije
- $v$  [m/s] - brzina tečenja u cijevi

Potrebno je izračunati Reynoldsov broj koji predstavlja kriterij za definiranje režima strujanja:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (112)$$

Za  $Re > 2320$  strujanje je turbulentno, a koeficijent otpora trenja računa se prema Prandtl-Karmanov-u zakonu:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,14 - 2 \log \left( \frac{\nu}{vD} \right) \quad (113)$$

gdje je

- $\nu$  [m<sup>2</sup>/s] - koeficijent kinematičke viskoznosti tekućine
- $\varepsilon$  [m] - apsolutna pogonska hidraulička hrapavost
- $D$  [m] - promjer cijevi

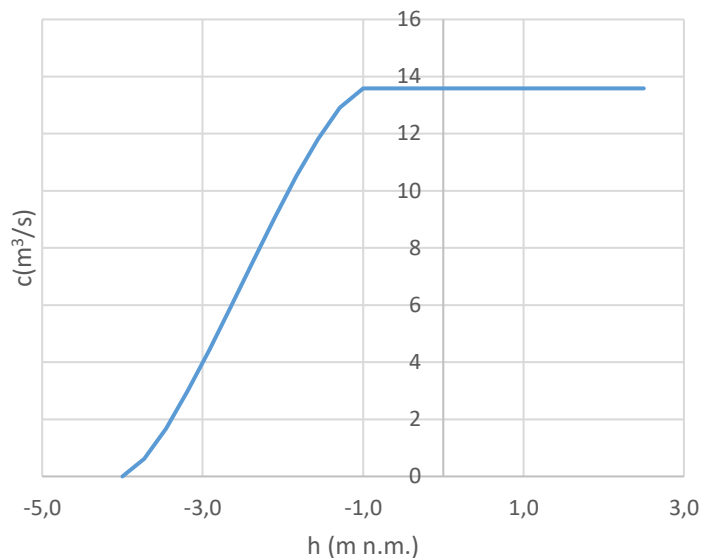
Za vrijednosti iz Tablica 1 izvršen je proračun provodljivosti za 25 piezometarskih razina.

Tablica 3 Ulazne vrijednosti za proračun provodljivosti cijevi

$Q$ [m <sup>3</sup> /s]	$\xi_u$	$\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	$l$ [m]	$D$ [m]	$\alpha$	$\varepsilon$ [m]
1	0,5	0,00000114	730	3	1,1	0,001

Table 1. . Odnos vodostaja, površine poprečnog presjeka i provodljivosti za cijev

h (m)	A (m <sup>2</sup> )	C (m <sup>3</sup> /s)
-4,0000	0,0000	0,0000
-3,7292	0,3165	0,6149
-3,4583	0,8691	1,6717
-3,1875	1,5465	2,9783
-2,9167	2,3006	4,4205
-2,6458	3,0975	5,9518
-2,3750	3,9089	7,5108
-2,1042	4,7079	9,0461
-1,8333	5,4663	10,5105
-1,5625	6,1511	11,8171
-1,2917	6,7156	12,9124
-1,0000	7,0686	13,5849
-0,7292	7,0686	13,5849
-0,4583	7,0686	13,5849
-0,1875	7,0686	13,5849
0,0833	7,0686	13,5849
0,3542	7,0686	13,5849
0,6250	7,0686	13,5849
0,8958	7,0686	13,5849
1,1667	7,0686	13,5849
1,4375	7,0686	13,5849
1,7083	7,0686	13,5849
1,9792	7,0686	13,5849
2,2500	7,0686	13,5849
2,5000	7,0686	13,5849



Slika 18. Odnos vodostaja i provodljivosti za cijev

### 4.1.3. GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE KANALA

Rukavci su podijeljeni na konačne elemente, te je na svakom elementu definiran poprečni presjek i to u sredini elementa, te je definirana funkcionalna ovisnost nadmorske visine  $h$  i provodljivosti poprečnog presjeka.

Iz poglavlja 3 je poznat izraz za provodljivost konačnog elementa:

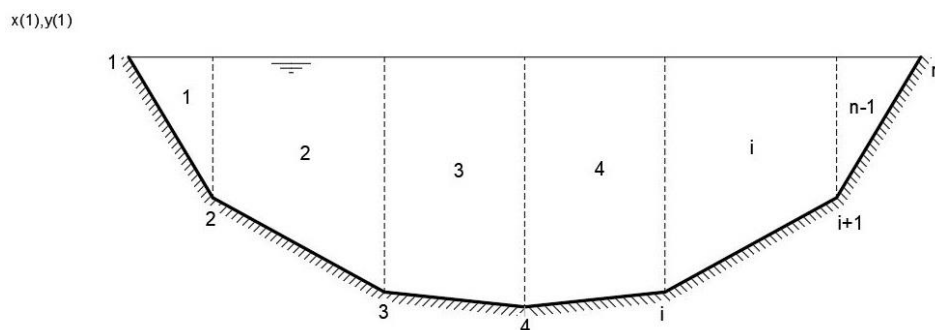
$$C(h) = K \cdot \frac{A(h)^{\frac{5}{3}}}{O(h)^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{L}}$$

Kako bi se definirala funkcionalna ovisnost provodljivosti i nadmorske visine treba, za različite visine vodnog lica, poznavati omočenu površinu poprečnog presjeka i omočeni opseg. Kao gornja granica nadmorske visine do koje se analizirala provodljivost uzeta je visina od 2.5 m n.m. jer je pretpostavljeno da oscilacije razine glavnog toka Neretve u kanalu neće ni u jednom slučaju preći tu visinu.

Geometrijske karakteristike rukavca Stara gornja Neretva dobivene su na osnovu geodetske podloge (Hrvatske vode), a definirane su u odnosu na trenutnu važeću geodetsku nulu, tj. HVRS71 visinski datum. Geodetsku podlogu rukavca Stara donja Neretva nisu imali, ali su definirali da je prosječna dubina u rukavcu 5 m. Na temelju toga je definiran 3D model rukavaca i terena. 3D modela terena izrađen je u programu AutoCAD Civil 3D te na toj osnovi su definirani poprečni presjeci u središtu konačnih elemenata.

#### Definiranje funkcije provodljivosti konačnih elemenata i horizontalnih površina za čvorove

U svrhu jednostavnijeg definiranja omočenih površina i omočenih opsega za različite nadmorske visine pojedinih poprečnih profila, napisan je pomoćni program u FORTRAN-u, „Predprogram“. Program radi na sljedeći način:

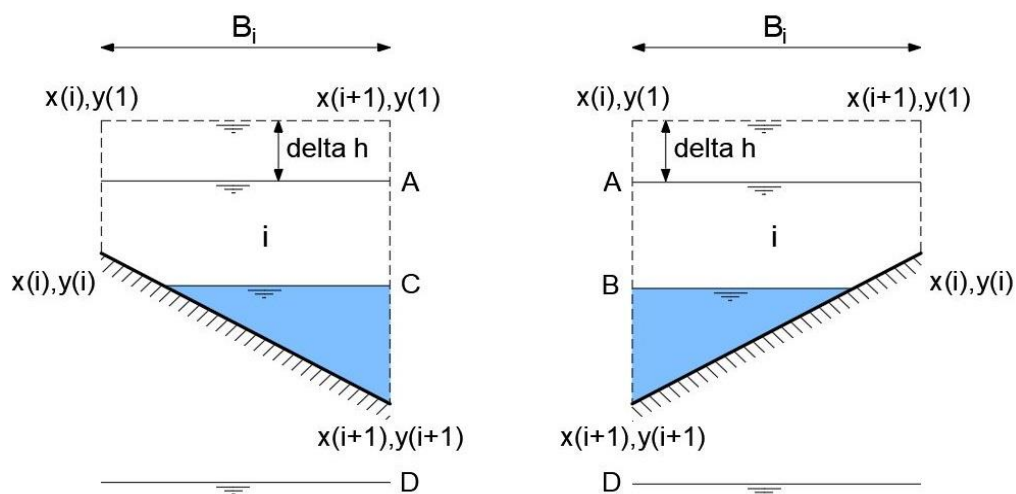


Slika 19 Shema poprečnog presjeka



Svaki poprečni presjek prikazan je kao jedinstvena poli-linija u AutoCAD-u. Prednost poli-linija je što su na svakom lomu linije prikazane koordinate točaka u referentnom sustavu AutoCAD-a. Naredbom „LIST“ su očitane i zapisane koordinate svih točaka svakog poprečnog presjeka. Te koordinate su kasnije poslužile kao ulaz u program „Predprogram“. (programsko rješenje je prikazano u poglavlju 6.1)

Nakon što program definira maksimalnu i minimalnu kotu presjeka, dijeli ga na 25 jednakih inkremenata i računa za svaki inkrement visine omočenu površinu, omočeni opseg i širinu vodnog lica za svaki  $i$ -ti element presjeka (Slika 20).



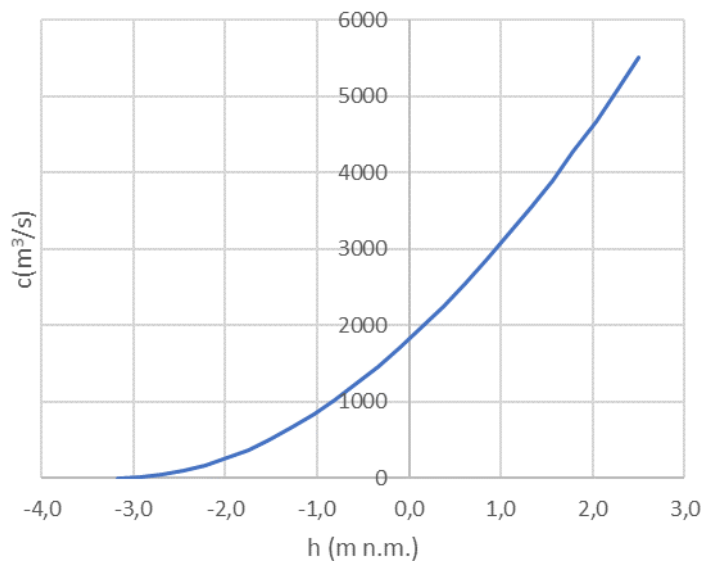
Slika 20 Različita stanja razine vodnog lica u elementu  $i$

Na Slika 20 prikazana su 4 moguća položaja razine vodnog lica u odnosu na geometriju elementa  $i$ . Na osnovu njih napisani su izrazi kojima program računa omočenu površinu, omočeni opseg i širinu vodnog lica.

Na osnovu određenih podataka definirana je omočena površina i provodljivost elementa za svaki inkrement visine vodnog lica. Nakon toga izračunate su horizontalne površine vodnog lica za svaki inkrement, koje su pridružene čvorovima. Horizontalne površine su računane kao umnožak srednje vrijednosti širina vodnog lica na polovini elementa, izračunatih u prethodnom koraku, i duljine između polovina elemenata (svakom čvoru je pridružena volumetrija s polovine uzvodnog i nizvodnog elementa).

Tablica 4 Odnos vodostaja, površine poprečnog presjeka i provodljivosti za element na stacionaži 0+550,00

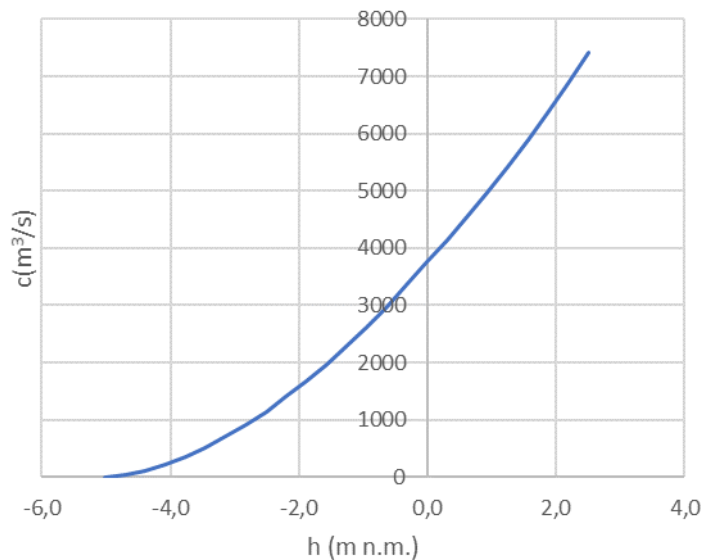
h (m)	A (m <sup>2</sup> )	C (m <sup>3</sup> /s)
-3,17	0,00	0,00
-2,93	8,68	11,09
-2,70	21,67	43,93
-2,46	36,53	98,60
-2,23	52,66	172,76
-1,99	69,99	265,34
-1,75	88,34	375,32
-1,52	107,87	507,64
-1,28	128,12	662,88
-1,04	148,93	836,39
-0,81	170,30	1027,96
-0,57	192,18	1237,94
-0,34	214,57	1464,87
-0,10	237,45	1710,04
0,14	260,79	1972,84
0,37	284,59	2252,45
0,61	308,81	2551,67
0,85	333,43	2868,66
1,08	358,39	3201,75
1,32	383,78	3545,30
1,56	409,65	3903,69
1,79	435,99	4278,46
2,03	462,80	4669,67
2,26	490,08	5077,39
2,50	517,84	5506,29



Slika 21. Odnos vodostaja i provodljivosti za element na stacionaži 0+550,00

Tablica 5 Odnos vodostaja, površine poprečnog presjeka i provodljivosti za element na stacionaži 4+450,00

h (m)	A (m <sup>2</sup> )	C (m <sup>3</sup> /s)
-5,02	0,00	0,00
-4,71	19,23	35,18
-4,39	38,89	111,96
-4,08	58,97	220,64
-3,77	79,46	357,36
-3,45	100,39	519,86
-3,14	121,73	706,59
-2,83	143,49	916,45
-2,51	165,68	1148,63
-2,20	188,29	1402,08
-1,89	211,35	1676,62
-1,57	234,83	1972,79
-1,26	258,72	2290,81
-0,95	283,01	2629,05
-0,63	307,68	2987,28
-0,32	332,75	3365,29
-0,01	358,22	3762,94
0,31	384,22	4152,82
0,62	410,94	4560,65
0,93	438,46	4978,63
1,25	466,81	5418,78
1,56	496,01	5881,53
1,87	526,04	6367,31
2,19	556,92	6876,84
2,50	588,63	7410,29



Slika 22. Odnos vodostaja i provodljivosti za element na stacionaži 4+450,00

### Definiranje Stricklerovog koeficijenta, te stacionaža elemenata i čvorova

Za sve elemente, na osnovu tablice koeficijenata hrapavosti (Slika 23), pretpostavljena je vrijednost Stricklerovog koeficijenta 40.

Kategorije	Vrsta stijenki	n	K=1/n
I	Osobito glatke površine; emajlirane ili glazirane površine	0.009	111
II	Vrlo brižno oblanjane daske i dobro sastavljene; najbolja čista cementna žbuka (zaglađena)	0.010	100
III	Najbolja cementna žbuka (1/3 pijeska); čiste nove grnčarske cijevi; cijevi od lijevana željeza; dobro sastavljene željezne cijevi; dobro oblanjane daske.	0.011	90.9
IV	Neoblanjane daske, dobro sastavljene; vodovodne cijevi u normalnim okolnostima, bez veće inkrustacije; vrlo čiste cijevi za otpadnu vodu i vrlo dobar beton.	0.012	83.3
V	Drvena obloga dobro obrađena; dobra obloga od opeke; cijevi za otpadnu vodu u normalnim okolnostima; ponešto nečiste cijevi za vodu.	0.013	76.9
VI	Zaprjane cijevi (vodovodne i za otpadnu vodu); betonirani kanali u srednjim okolnostima.	0.014	71.4
VII	Srednje dobra obloga od opeke; tarac od klesana kamena u srednjim okolnostima; dovoljno zaprljane cijevi za odvod otpadne vode; cerada na drvenim letvama.	0.015	66.7
VIII	Dobar tarac od lomljena kamena; stara (oštećena) obloga od opeke; relativno grub beton.	0.017	58.8
IX	Kanal pokriven debelim stabilnim slojem mulja, kanali u zbijenom sitnom šljunku, pokriveni neprekidnim tankim slojem mulja (pri tome sve u besprijekornom stanju).	0.018	55.6
X	Srednje dobar tarac od lomljena kamena; tarac od oblutaka; kanali usječeni u kamenu; kanali u lesu, prekriveni tankim slojem mulja (u običnom stanju).	0.02	50.0
XI	Kanali u zbijenoj glini; kanali u lesu, šljunku i zemlji, pokriveni isprekidano tankim slojem mulja; veliki zemljani kanali u dobrom stanju	0.0225	44.4
XII	Dobra suha obloga, veliki zemljani kanali srednje održavani i mali zemljani kanali dobro održavani; rijeke u veoma dobrim okolnostima (čisto, pravolinijsko korito sa slobodnim tokom, bez obalnih urušavanja i dubokih vododerina)	0.025	40.0
XIII	Veliki zemljani kanali u nešto slabijem stanju i mali kanali u dobrom stanju.	0.0275	36.4
XIV	Zemljani kanali u slabom stanju, na primjer sa šašem, oblucima ili šljunkom na dnu, poprilično zarasli travom, s odronjavanjem obalnih kosina i sl.; rijeke u dobrim okolnostima tečenja.	0.03	33.3
XV	Kanali u vrlo lošim okolnostima (s nepravilnim profilima, poprilično zatrpani kamenom i s vodenom travom); rijeke u relativno dobrom stanju, ali s nekom količinom kamena i šaši.	0.035	28.6
XVI	Kanali u vrlo lošem stanju (sa znatnim vododerinama i odronjavanjima obala, zarasli šašem, s krupnim kamenjem na dnu i sl.); rijeke s pogoršanim okolnostima tečenja (u usporedbi s prethodnom t.), s povećanom količinom kamena i šaši, s vijugavim koritima	0.04 i više	25.0 i manje

Slika 23 Tablica Manning-ovih i Stricklerovih koeficijenata za različite vrste obloga kanala

Duljine svih elemenata, Stricklerovih koeficijenata, stacionaže elemenata i čvorova, te indeksi elemenata i čvorova prokazani su za varijantu 1 (varijanta s cijevi) u Tablica 6, za varijantu 2 (varijanta s kanalom) u Tablica 7.

Tablica 6 Geometrijske karakteristike elemenata i čvorova za varijantu 1

Čvor uzvodno	Čvor nizvodno	Stacionaža uzvodnog čvora	Stacionaža elementa	Stacionaža nizvodnog čvora	Duljina elementa	K	Vrsta elementa
1	2	0,0	75,0	150,0	150	40	Ustava
2	3	150,0	187,5	225,0	75	40	Kanal
3	4	225,0	262,5	300,0	75	40	Kanal
4	5	300,0	350,0	400,0	100	40	Kanal
5	6	400,0	450,0	500,0	100	40	Kanal
6	7	500,0	550,0	600,0	100	40	Kanal
7	8	600,0	650,0	700,0	100	40	Kanal
8	9	700,0	750,0	800,0	100	40	Kanal
9	10	800,0	850,0	900,0	100	40	Kanal
10	11	900,0	950,0	1000,0	100	40	Kanal
11	12	1000,0	1025,0	1050,0	50	40	Kanal
12	13	1050,0	1415,0	1780,0	730	40	Cijev
13	14	1780,0	1810,0	1840,0	60	40	Kanal
14	15	1840,0	1870,0	1900,0	60	40	Kanal
15	16	1900,0	1950,0	2000,0	100	40	Kanal
16	17	2000,0	2050,0	2100,0	100	40	Kanal
17	18	2100,0	2150,0	2200,0	100	40	Kanal
18	19	2200,0	2250,0	2300,0	100	40	Kanal
19	20	2300,0	2350,0	2400,0	100	40	Kanal
20	21	2400,0	2450,0	2500,0	100	40	Kanal
21	22	2500,0	2550,0	2600,0	100	40	Kanal
22	23	2600,0	2650,0	2700,0	100	40	Kanal
23	24	2700,0	2750,0	2800,0	100	40	Kanal
24	25	2800,0	2850,0	2900,0	100	40	Kanal
25	26	2900,0	2950,0	3000,0	100	40	Kanal
26	27	3000,0	3050,0	3100,0	100	40	Kanal
27	28	3100,0	3150,0	3200,0	100	40	Kanal
28	29	3200,0	3250,0	3300,0	100	40	Kanal
29	30	3300,0	3350,0	3400,0	100	40	Kanal
30	31	3400,0	3450,0	3500,0	100	40	Kanal
31	32	3500,0	3550,0	3600,0	100	40	Kanal
32	33	3600,0	3650,0	3700,0	100	40	Kanal
33	34	3700,0	3750,0	3800,0	100	40	Kanal
34	35	3800,0	3850,0	3900,0	100	40	Kanal
35	36	3900,0	3950,0	4000,0	100	40	Kanal
36	37	4000,0	4050,0	4100,0	100	40	Kanal
37	38	4100,0	4150,0	4200,0	100	40	Kanal
38	39	4200,0	4250,0	4300,0	100	40	Kanal
39	40	4300,0	4350,0	4400,0	100	40	Kanal
40	41	4400,0	4450,0	4500,0	100	40	Kanal
41	42	4500,0	4550,0	4600,0	100	40	Kanal
42	43	4600,0	4650,0	4700,0	100	40	Kanal
43	44	4700,0	4750,0	4800,0	100	40	Kanal
44	45	4800,0	4850,0	4900,0	100	40	Kanal
45	46	4900,0	4950,0	5000,0	100	40	Kanal
46	47	5000,0	5050,0	5100,0	100	40	Kanal
47	48	5100,0	5137,5	5175,0	75	40	Kanal
48	49	5175,0	5212,5	5250,0	75	40	Kanal
49	50	5250,0	5305,0	5360,0	110	40	Ustava

Tablica 7 Geometrijske karakteristike elemenata i čvorova za varijantu 2

Čvor uzvodno	Čvor nizvodno	Stacionaža uzvodnog čvora	Stacionaža elementa	Stacionaža nizvodnog čvora	Duljina elementa	K	Vrsta elementa
1	2	0,0	75,0	150,0	150	40	Ustava
2	3	150,0	187,5	225,0	75	40	Kanal
3	4	225,0	262,5	300,0	75	40	Kanal
4	5	300,0	350,0	400,0	100	40	Kanal
5	6	400,0	450,0	500,0	100	40	Kanal
6	7	500,0	550,0	600,0	100	40	Kanal
7	8	600,0	650,0	700,0	100	40	Kanal
8	9	700,0	750,0	800,0	100	40	Kanal
9	10	800,0	850,0	900,0	100	40	Kanal
10	11	900,0	950,0	1000,0	100	40	Kanal
11	12	1000,0	1025,0	1050,0	50	40	Kanal
12	13	1050,0	1075,0	1100,0	50	40	Kanal
13	14	1100,0	1150,0	1200,0	100	40	Kanal
14	15	1200,0	1250,0	1300,0	100	40	Kanal
15	16	1300,0	1350,0	1400,0	100	40	Kanal
16	17	1400,0	1450,0	1500,0	100	40	Kanal
17	18	1500,0	1550,0	1600,0	100	40	Kanal
18	19	1600,0	1650,0	1700,0	100	40	Kanal
19	20	1700,0	1750,0	1800,0	100	40	Kanal
20	21	1800,0	1850,0	1900,0	100	40	Kanal
21	22	1900,0	1950,0	2000,0	100	40	Kanal
22	23	2000,0	2050,0	2100,0	100	40	Kanal
23	24	2100,0	2150,0	2200,0	100	40	Kanal
24	25	2200,0	2250,0	2300,0	100	40	Kanal
25	26	2300,0	2350,0	2400,0	100	40	Kanal
26	27	2400,0	2450,0	2500,0	100	40	Kanal
27	28	2500,0	2550,0	2600,0	100	40	Kanal
28	29	2600,0	2650,0	2700,0	100	40	Kanal
29	30	2700,0	2750,0	2800,0	100	40	Kanal
30	31	2800,0	2850,0	2900,0	100	40	Kanal
31	32	2900,0	2950,0	3000,0	100	40	Kanal
32	33	3000,0	3050,0	3100,0	100	40	Kanal
33	34	3100,0	3150,0	3200,0	100	40	Kanal
34	35	3200,0	3250,0	3300,0	100	40	Kanal
35	36	3300,0	3350,0	3400,0	100	40	Kanal
36	37	3400,0	3450,0	3500,0	100	40	Kanal
37	38	3500,0	3550,0	3600,0	100	40	Kanal
38	39	3600,0	3650,0	3700,0	100	40	Kanal
39	40	3700,0	3750,0	3800,0	100	40	Kanal
40	41	3800,0	3850,0	3900,0	100	40	Kanal
41	42	3900,0	3950,0	4000,0	100	40	Kanal
42	43	4000,0	4050,0	4100,0	100	40	Kanal
43	44	4100,0	4150,0	4200,0	100	40	Kanal
44	45	4200,0	4250,0	4300,0	100	40	Kanal
45	46	4300,0	4350,0	4400,0	100	40	Kanal
46	47	4400,0	4450,0	4500,0	100	40	Kanal
47	48	4500,0	4550,0	4600,0	100	40	Kanal
48	49	4600,0	4650,0	4700,0	100	40	Kanal
49	50	4700,0	4750,0	4800,0	100	40	Kanal
50	51	4800,0	4850,0	4900,0	100	40	Kanal
51	52	4900,0	4950,0	5000,0	100	40	Kanal
52	53	5000,0	5050,0	5100,0	100	40	Kanal
53	54	5100,0	5137,5	5175,0	75	40	Kanal
54	55	5175,0	5212,5	5250,0	75	40	Kanal
55	56	5250,0	5305,0	5360,0	110	40	Ustava

#### 4.1.4. RUBNI UVJETI

Rubni uvjeti su definirani vodostajem u glavnom toku Neretve, a mjerne stanice (limnigrafa) su Metković, Opuzen, Ustava ušće (mareograf) te crpna stanica Veraja (Hrvatske vode). Vrijednosti vodostaja su izmjerene , svakih sat vremena, za razdoblje od 10.6.2017. do 13.6.2018.. Svi limnigrafi su postavljeni na geodetsku nulu, tj. HVRS71 visinski datum . Za određivanje rubnih uvjeta ključni su limnigraf Metković i Opuzen, čija udaljenost iznosi 8995 m, zbog toga što se ulaz i izlaz u rukavac nalaze između ta dva limnigrafa. Tablica 8. prikazuje udaljenosti između limnigrafa, kao i udaljenost od limnigrafa Metković do ulaza i izlaza iz rukavca.

Tablica 8. Lokacija i udaljenosti bitnih točaka na glavnom toku Neretve

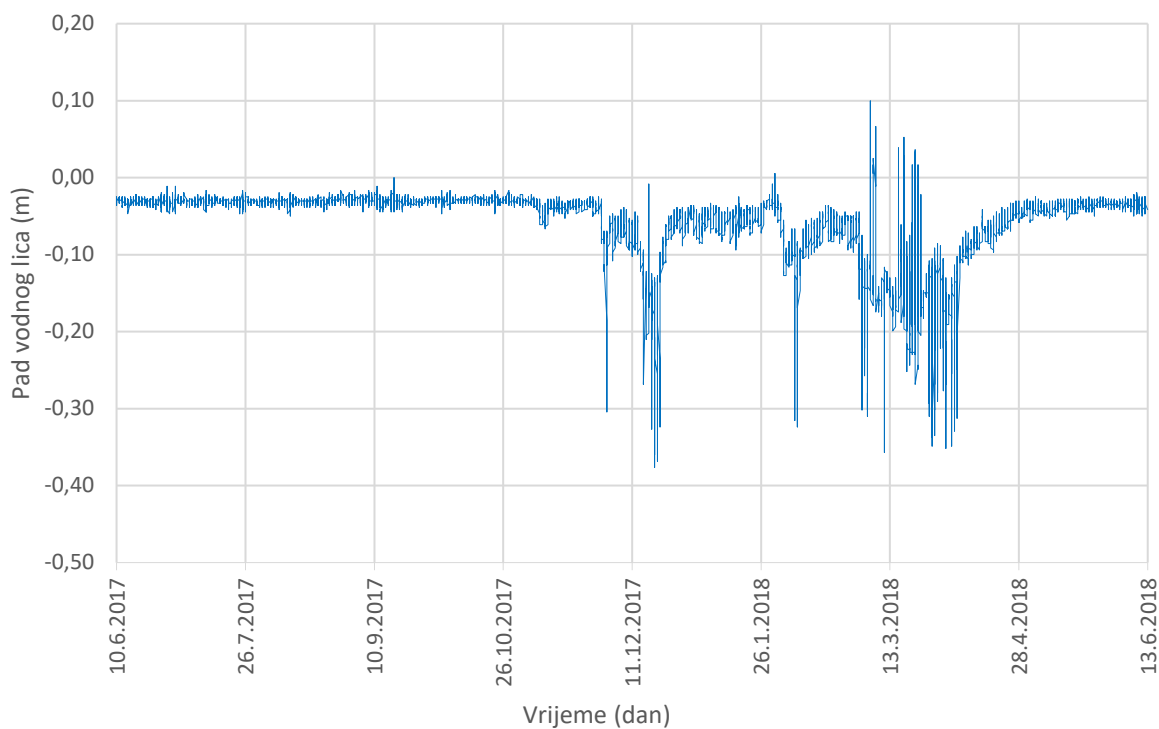
Lokacija	Udaljenost (m)
Limnigraf - Metković	0
Ulaz u rukavac - Sjeverna ustava	2715
Izlaz iz rukavca - Južna ustava	5205
Limnigraf - Opuzen	8995

Linearnom interpolacijom vodostaja između limnigrafa Metković i Opuzen dobivene su vrijednosti na ulazu i izlazu iz rukavca. Tablica 9. prikazuje minimalni, maksimalni i prosječni vodostaj na ulazu i izlazu u rukavac za zadano razdoblje. Prosječna razlika pada vodostaja između ulaza i izlaza u rukavac iznosi svega 6 cm.

Tablica 9. Vrijednosti vodostaja na ulazu i izlazu iz rukavca

	Ulaz u rukavac	Izlaz iz rukavca
<b>Minimalni vodostaj (m n.m.)</b>	-0,21	-0,21
<b>Maksimalni vodostaj (m n.m.)</b>	1,93	1,85
<b>Prosječni vodostaj (m n.m.)</b>	0,41	0,36

Svakog sata odnos vodostaja na ulazu i izlazu iz rukavca se mijenja, te je potrebno odrediti najnepovoljniji slučaj. Najnepovoljniji slučaj se ostvari kada je pad vodnog lica najveći (negativni pad je prema ušću), za određeni broj dana (ovim slučaju broj dana je 12). Pad vodnog lica za cijelo vremensko razdoblje prikazuje Slika 24. Slika 24 .Na dijagramu se može vidjeti da postoji relativno mali broj sata s pozitivnim padom vodnog lica.



Slika 24. Prikaz razlike vodnog lica u vremenu

Tablica 10 i Tablica 11 prikazuju ekstreme padova vodostaja, prosječnu vrijednost i vrijeme negativnog i pozitivnog pada vodnog lica.

Tablica 10. Vrijeme trajanja pozitivnog i negativnog pada vodnog lica

	Vrijeme (h)
Negativnim padom vodnog lica	8811
Pozitivnim padom vodnog lica	20
Broj sati bez pada vodnog lica	1

Tablica 11. Ekstremi pada vodnog lica

	Pad vodnog lica (m)
Maksimalni negativni pad vodnog lica	-0,38
Prosječni pad vodnog lica	-0,06
Maksimalni pozitivni pad vodnog lica	0,10

#### 4.1.5. FORMIRANJE ULAZNOG FILE-A

Ulazni parametri potrebni za proračun:

Tablica 12. Ulazni parametri

$\theta$	$DT$	$NPIS$	$NDT$
0,55	5	12	51840

gdje je

$\theta$	– parameter numeričke integracije
$DT [m]$	– vremenski korak
$NPIS$	– broj vremenskih koraka koji se zapisuju (zapisuje se svakih 15 minuta)
$NDT$	– broj vremenskih koraka

Na osnovi svih prethodno definiranih podataka kreira se ulazni file na sljedeći način:

1.  $\theta$ ,  $DT$ ,  $NPIS$ ,  $NDT$
2.  $NCIT$
3.  $T(i)$ ,  $Hu(i)$ ,  $Hi(i)$   
 $T(NCIT)$ ,  $Hu(NCIT)$ ,  $Hi(NCIT)$
4.  $NEL$ ,  $NCVOR$
5.  $IEL$ ,  $STAC EL$ ,  $LEL$ ,  $STAC POČ$ ,  $STAC KRAJ$ ,  $ICVOR UZ$ ,  $ICVOR NIZ$   
 $HEL(i)$ ,  $AEL(i)$ ,  $CH(i)$  – 25 redova za jedan element  
....
6.  $ICVOR$ ,  $STAC. ČVORA$   
 $H CVORA(i)$ ,  $A HORIZONTALNO(i)$  – 25 redaka za jedan čvor  
....
7.  $Q0(\text{čvor } 1)$ ,  $Q0(\text{čvor } 2)$ , .....,  $Q0(\text{zadnji čvor})$

gdje je

$NCIT$	– broj podataka $T(i)$ , $Hu(i)$ , $Hi(i)$ koji definira razinu u glavnom toku Neretve na ulazu i izlazu iz rukavca – rubni uvjet
$NEL$	– broj elemenata
$NCVOR$	– broj čvorova
$IEL$	– redni broj elementa
$STAC EL$	– stacionaža sredine elementa
$LEL$	– duljina elementa

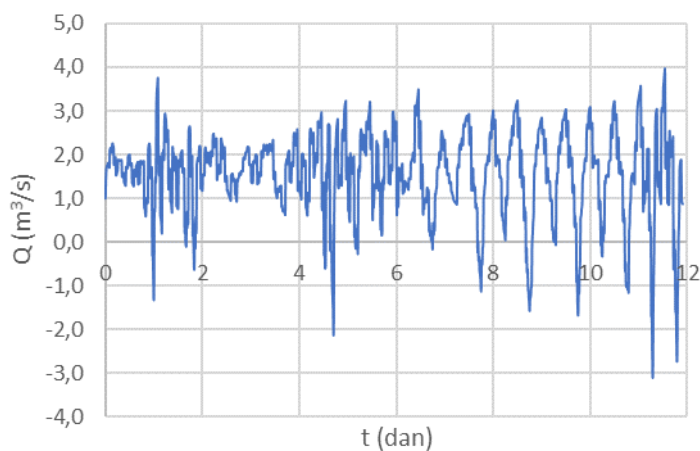


STAC POČ	– stacionaža početka elementa
STAC KRAJ	– stacionaža kraja elementa
ICVOR UZ	– redni broj uzvodnog čvora
ICVOR NIZ	– redni broj nizvodnog čvora
HEL(i)	– visina razine vodnog lica
AEL(i)	– omočena površina poprečnog presjeka
CH(i)	– provodljivost presjeka
ICVOR	– redni broj čvora
STAC. ČVORA	– stacionaža čvora
H CVORA(i)	– visina razine vodnog lica
A	– horizontalna površina koja pripada čvoru
HORIZONTALNO(i)	
Q0	– vanjsko prihranjivanje u čvorovima

Nakon definiranja ulaznog file-a, pristupa se proračunu u programu „Glavni program“, napisanom u FORTRAN 95 programskom jeziku (detaljan prikaz programa je dat u poglavlju 6.2). Rezultati proračuna su obrađeni u Excelu-u i prikazani u nastavku.

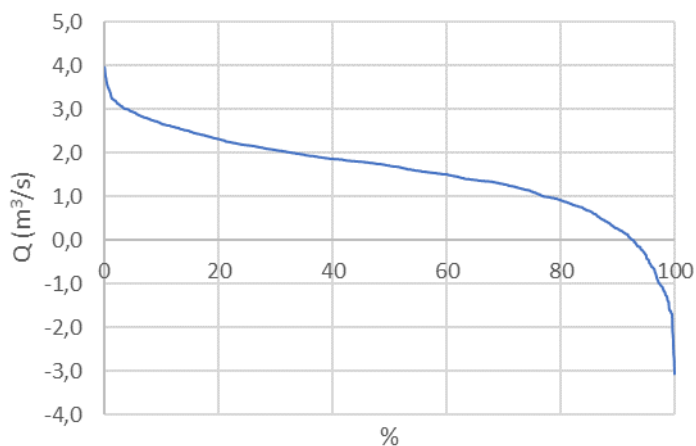
## 4.2. RJEŠENJA PRORAČUNA

### 4.2.1. VARIJANTA SA CIJEVI



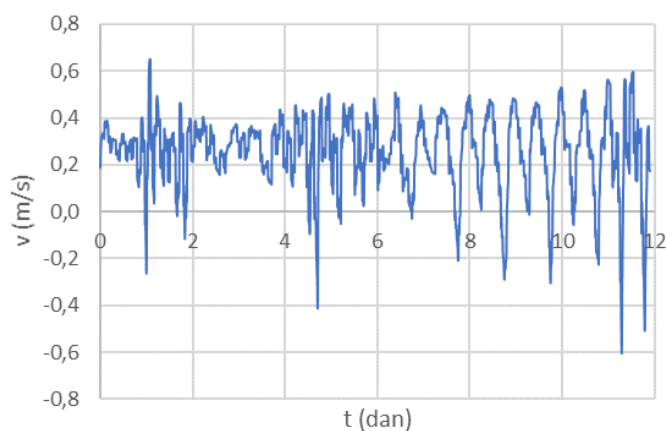
<b>Prosječni protok</b>	1,557	m <sup>3</sup> /s
<b>Minimalni protok</b>	-3,058	m <sup>3</sup> /s
<b>Maksimalni protok</b>	3,958	m <sup>3</sup> /s

Slika 25. Hidrogram 1. elementa



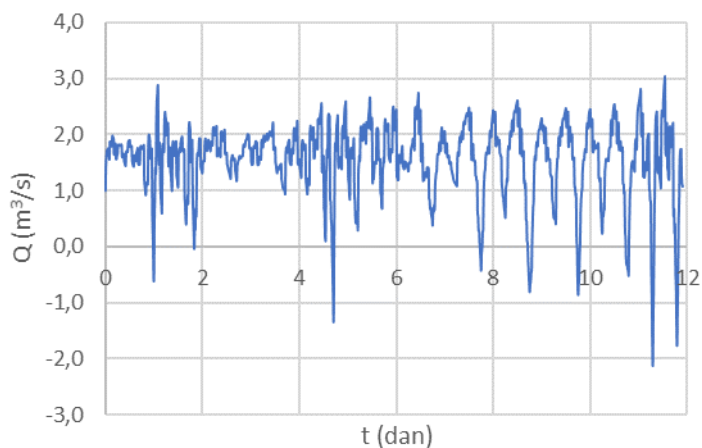
<b>Udio negativnog protoka</b>	7,26	%
--------------------------------	------	---

Slika 26. Krivulja trajanja protoka za 1. elementa



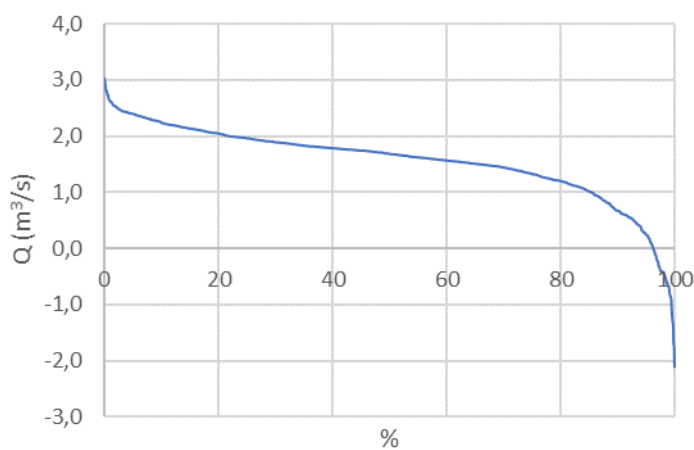
<b>Prosječna brzina</b>	0,258	m/s
<b>Minimalna brzina</b>	-0,598	m/s
<b>Maksimalna brzina</b>	0,651	m/s

Slika 27. Prikaz brzina u vremenu 1. elementa



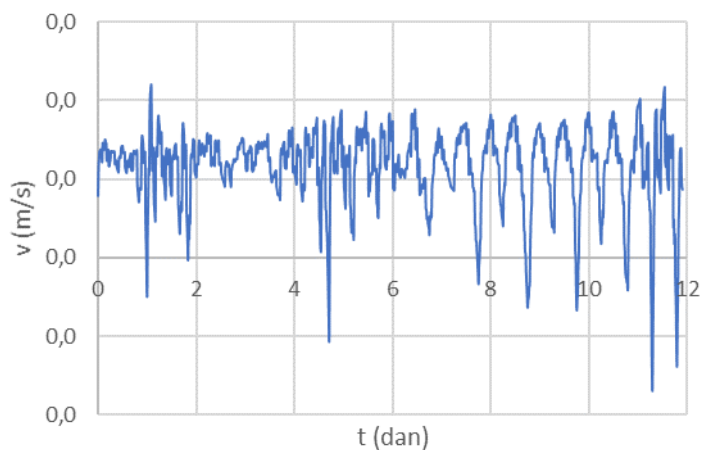
<b>Prosječni protok</b>	1,558	m <sup>3</sup> /s
<b>Minimalni protok</b>	-2,108	m <sup>3</sup> /s
<b>Maksimalni protok</b>	3,029	m <sup>3</sup> /s

Slika 28. Hidrogram 6. elementa



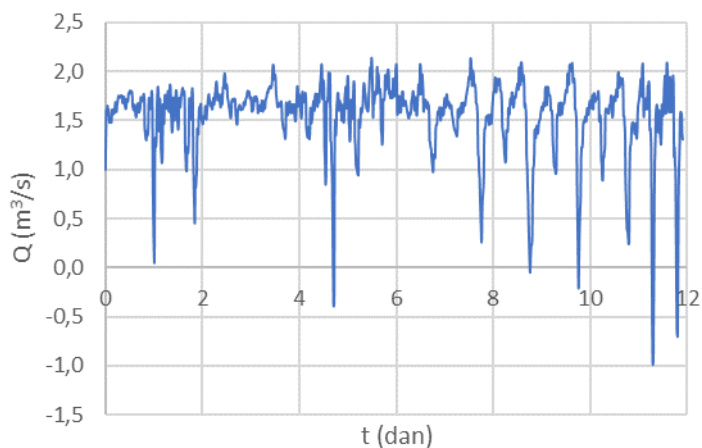
<b>Udio negativnog protoka</b>	3,85	%
--------------------------------	------	---

Slika 29. Krivulja trajanja protoka za 6. elementa



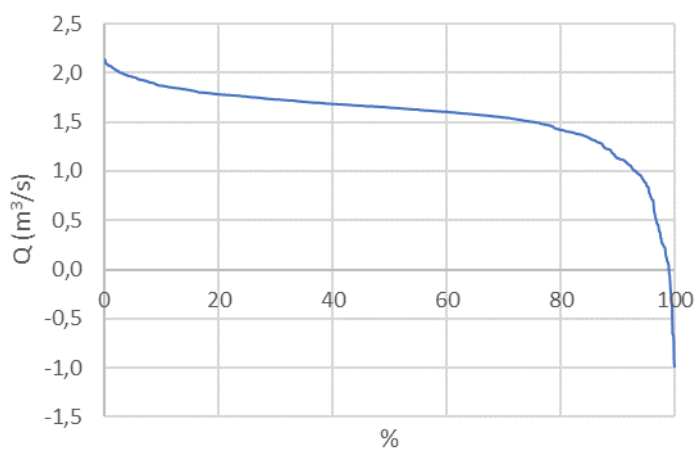
<b>Prosječna brzina</b>	0,006	m/s
<b>Minimalna brzina</b>	-0,008	m/s
<b>Maksimalna brzina</b>	0,011	m/s

Slika 30. Prikaz brzina u vremenu 6. elementa



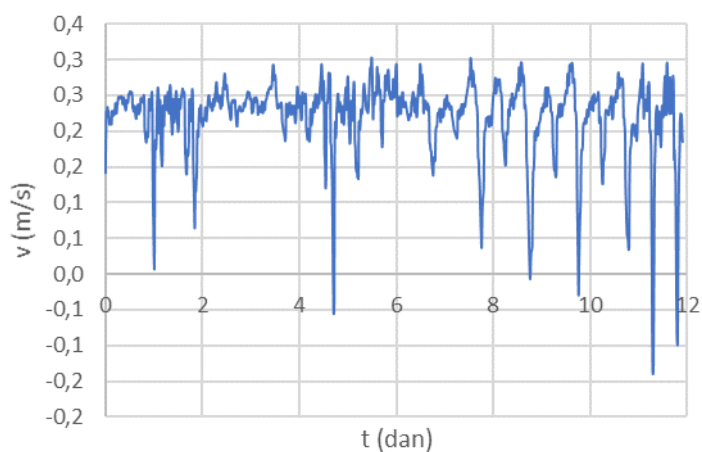
<b>Prosječni protok</b>	1,559	m <sup>3</sup> /s
<b>Minimalni protok</b>	-0,989	m <sup>3</sup> /s
<b>Maksimalni protok</b>	2,139	m <sup>3</sup> /s

Slika 31. Hidrogram 12. elementa



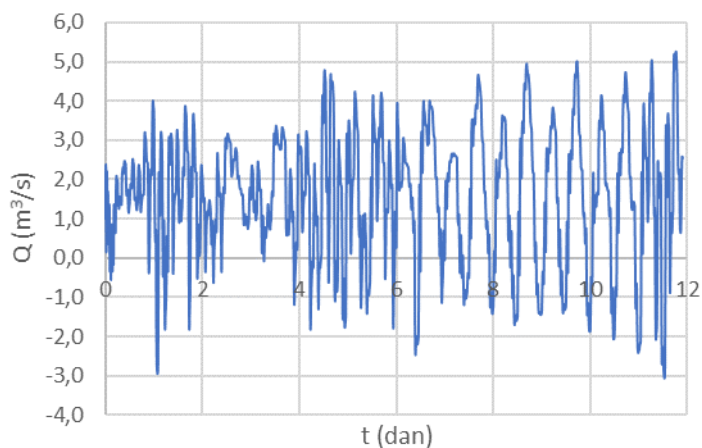
<b>Udio negativnog protoka</b>	1,05	%
--------------------------------	------	---

Slika 32. Krivulja trajanja protoka za 12. elementa



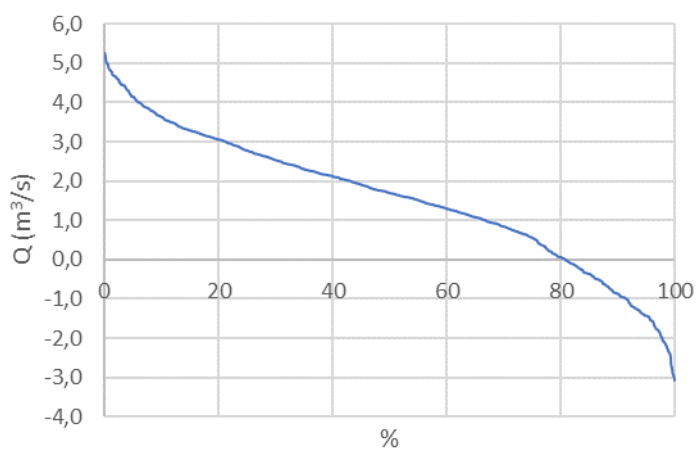
<b>Prosječna brzina</b>	0,221	m/s
<b>Minimalna brzina</b>	-0,140	m/s
<b>Maksimalna brzina</b>	0,303	m/s

Slika 33. Prikaz brzina u vremenu 12. elementa



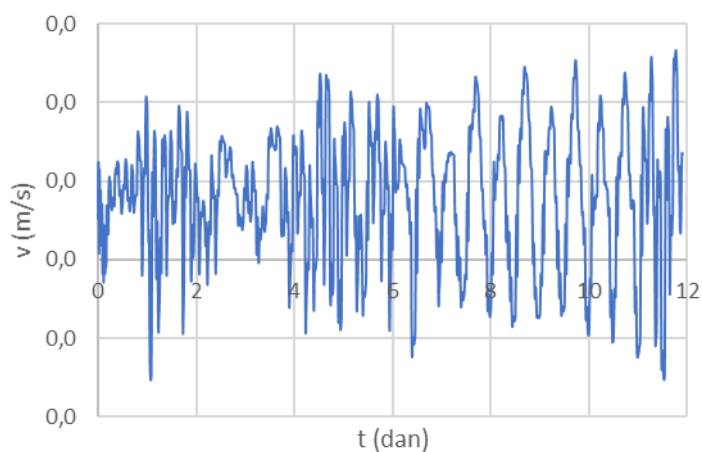
<b>Prosječni protok</b>	1,557	m <sup>3</sup> /s
<b>Minimalni protok</b>	-3,058	m <sup>3</sup> /s
<b>Maksimalni protok</b>	3,958	m <sup>3</sup> /s

Slika 34. Hidrogram 40. elementa



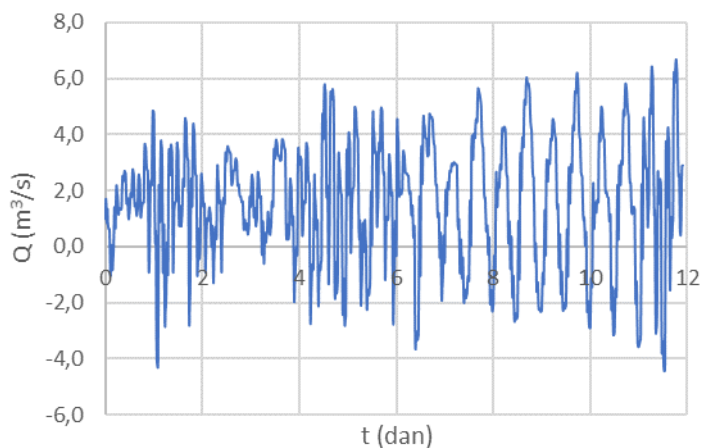
<b>Udio negativnog protoka</b>	19,14	%
--------------------------------	-------	---

Slika 35. Krivulja trajanja protoka za 40. elementa



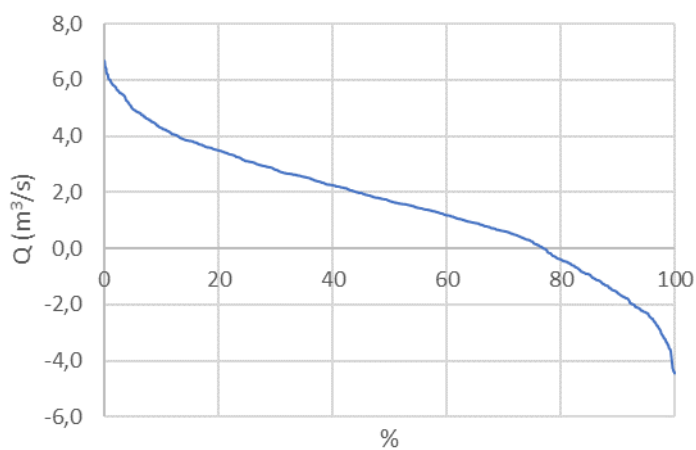
<b>Prosječna brzina</b>	0,004	m/s
<b>Minimalna brzina</b>	-0,008	m/s
<b>Maksimalna brzina</b>	0,013	m/s

Slika 36. Prikaz brzina u vremenu 40. elementa



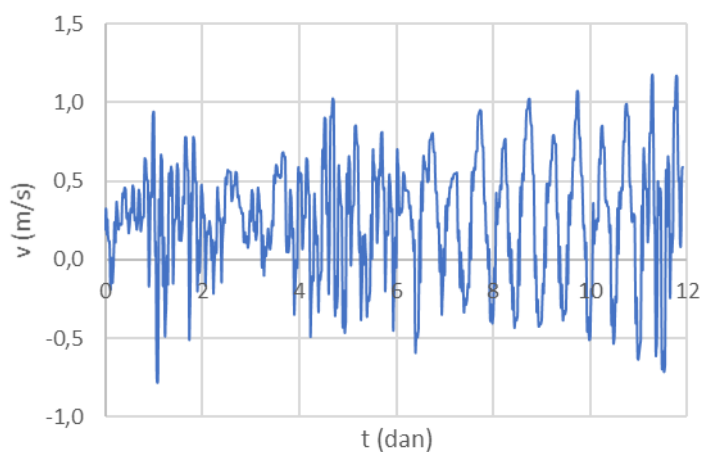
<b>Prosječni protok</b>	1,568	m <sup>3</sup> /s
<b>Minimalni protok</b>	-4,440	m <sup>3</sup> /s
<b>Maksimalni protok</b>	6,679	m <sup>3</sup> /s

Slika 37. Hidrogram 49. elementa



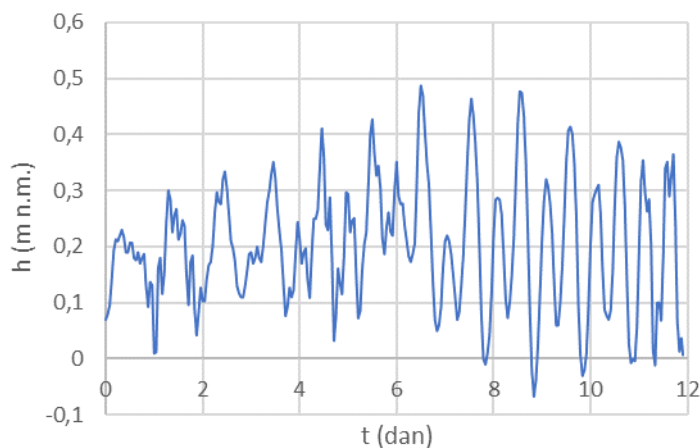
<b>Udio negativnog protoka</b>	23,08	%
--------------------------------	-------	---

Slika 38. Krivulja trajanja protoka za 49. elementa



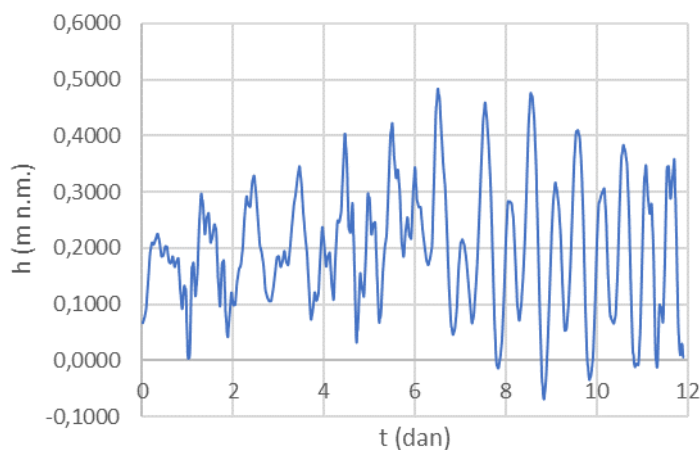
<b>Prosječna brzina</b>	0,267	m/s
<b>Minimalna brzina</b>	-0,782	m/s
<b>Maksimalna brzina</b>	1,178	m/s

Slika 39. Prikaz brzina u vremenu 49. elementa



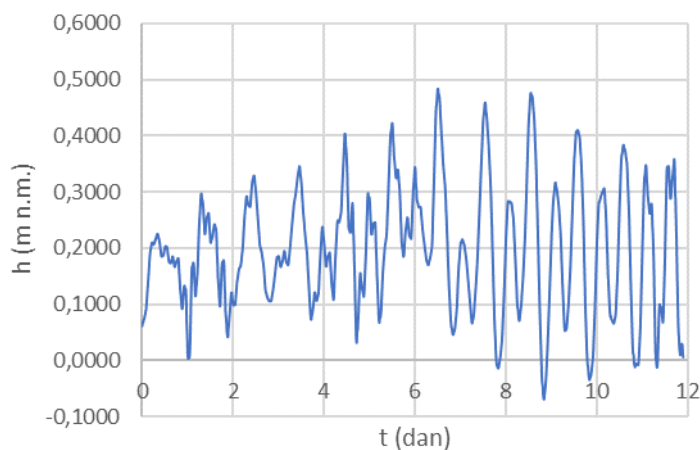
<b>Prosječna piezometarska visina</b>	0,203 m
<b>Minimalna piezometarska visina</b>	-0,067 m
<b>Maksimalna piezometarska visina</b>	0,487 m

Slika 40. Nivogram 1. čvora



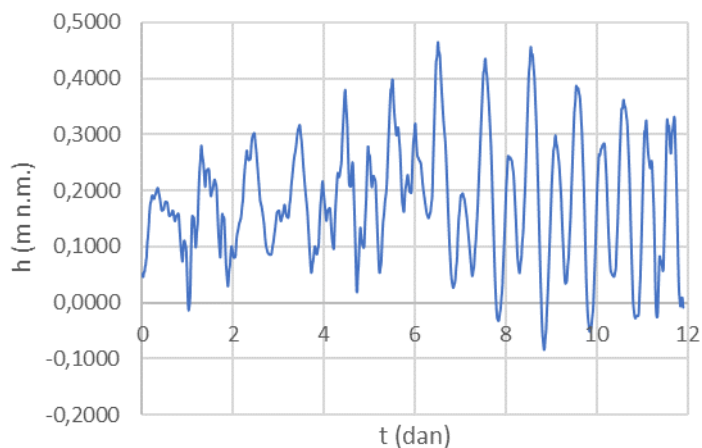
<b>Prosječna piezometarska visina</b>	0,198 m
<b>Minimalna piezometarska visina</b>	-0,069 m
<b>Maksimalna piezometarska visina</b>	0,484 m

Slika 41. Nivogram 6. čvora



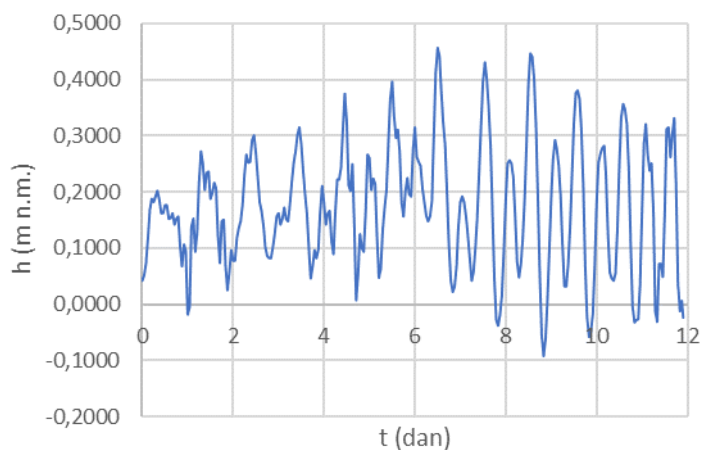
<b>Prosječna piezometarska visina</b>	0,198 m
<b>Minimalna piezometarska visina</b>	-0,069 m
<b>Maksimalna piezometarska visina</b>	0,484 m

Slika 42. Nivogram 12. čvora



<b>Prosječna piezometarska visina</b>	0,180	m
<b>Minimalna piezometarska visina</b>	-0,084	m
<b>Maksimalna piezometarska visina</b>	0,465	m

Slika 43. Nivogram 40. čvora

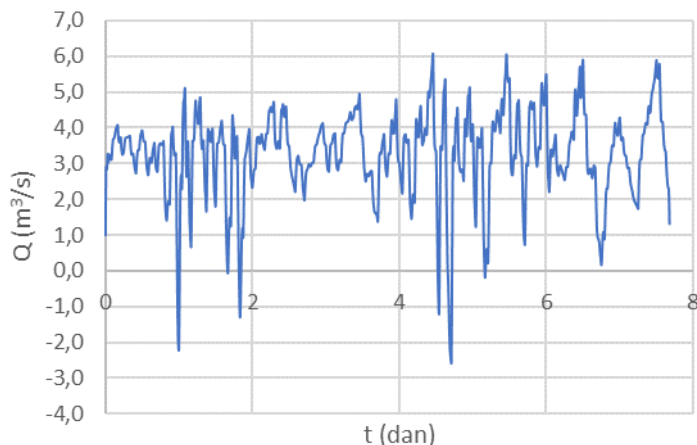


<b>Prosječna piezometarska visina</b>	0,174	m
<b>Minimalna piezometarska visina</b>	-0,092	m
<b>Maksimalna piezometarska visina</b>	0,456	m

Slika 44. Nivogram 50. čvora

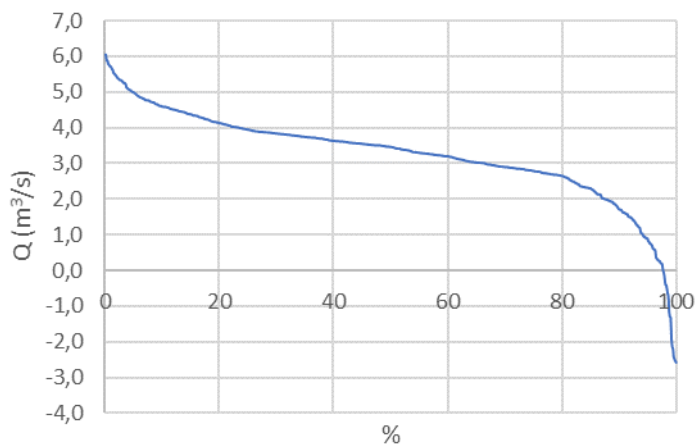


#### 4.2.2. VARIJANTA S KANALOM



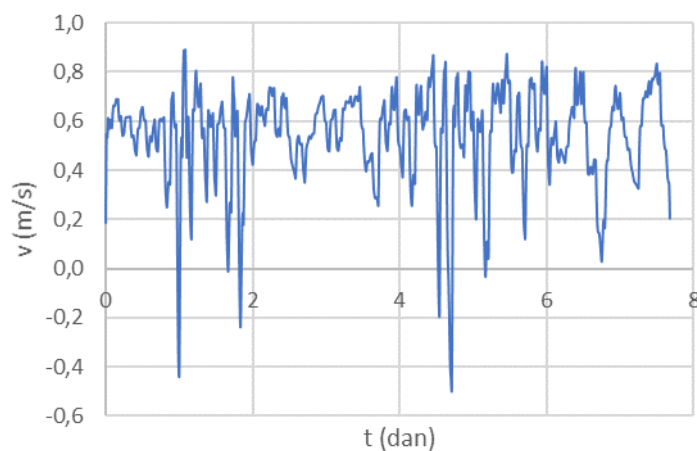
<b>Prosječni protok</b>	3,273	m <sup>3</sup> /s
<b>Minimalni protok</b>	-2,578	m <sup>3</sup> /s
<b>Maksimalni protok</b>	6,049	m <sup>3</sup> /s

Slika 45. Hidrogram 1. elementa



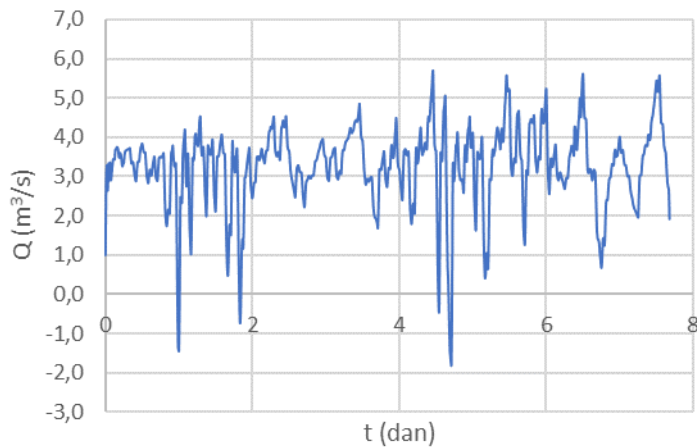
<b>Udio negativnog protoka</b>	2,17	%
--------------------------------	------	---

Slika 46. Krivulja trajanja protoka za 1. elementa



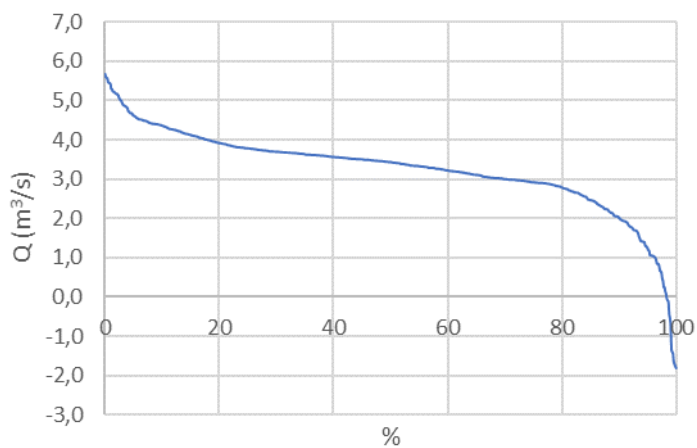
<b>Prosječna brzina</b>	0,540	m/s
<b>Minimalna brzina</b>	-0,496	m/s
<b>Maksimalna brzina</b>	0,889	m/s

Slika 47. Prikaz brzina u vremenu 1. elementa



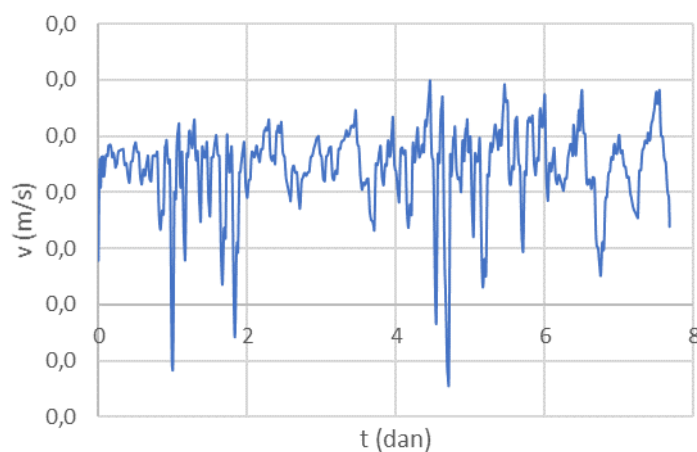
<b>Prosječni protok</b>	3,266	m <sup>3</sup> /s
<b>Minimalni protok</b>	-1,804	m <sup>3</sup> /s
<b>Maksimalni protok</b>	5,672	m <sup>3</sup> /s

Slika 48. Hidrogram 6. elementa



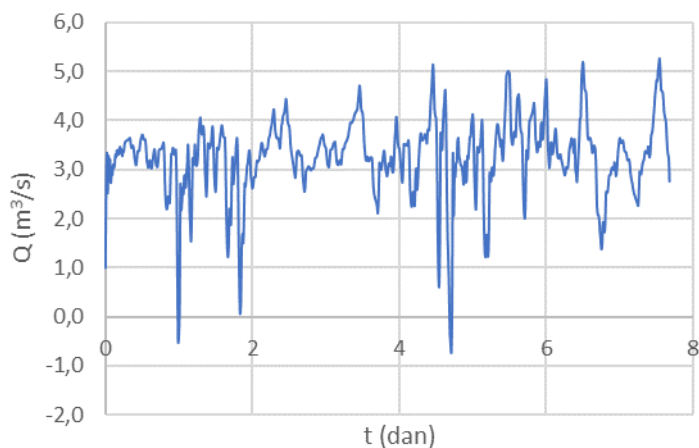
<b>Udio negativnog protoka</b>	1,49	%
--------------------------------	------	---

Slika 49. Krivulja trajanja protoka za 6. elementa



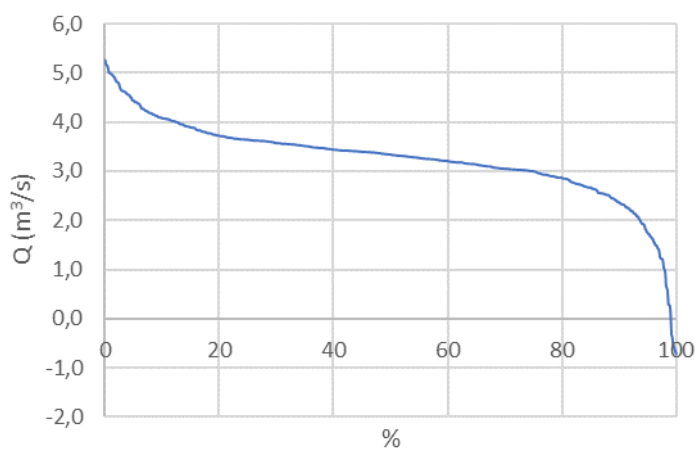
<b>Prosječna brzina</b>	0,012	m/s
<b>Minimalna brzina</b>	-0,007	m/s
<b>Maksimalna brzina</b>	0,020	m/s

Slika 50. Prikaz brzina u vremenu 6. elementa



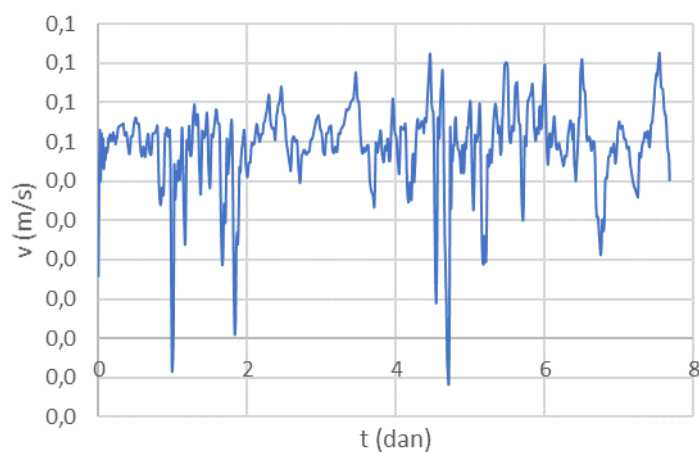
<b>Prosječni protok</b>	3,256	m <sup>3</sup> /s
<b>Minimalni protok</b>	-0,719	m <sup>3</sup> /s
<b>Maksimalni protok</b>	5,262	m <sup>3</sup> /s

Slika 51. Hidrogram 16. elementa



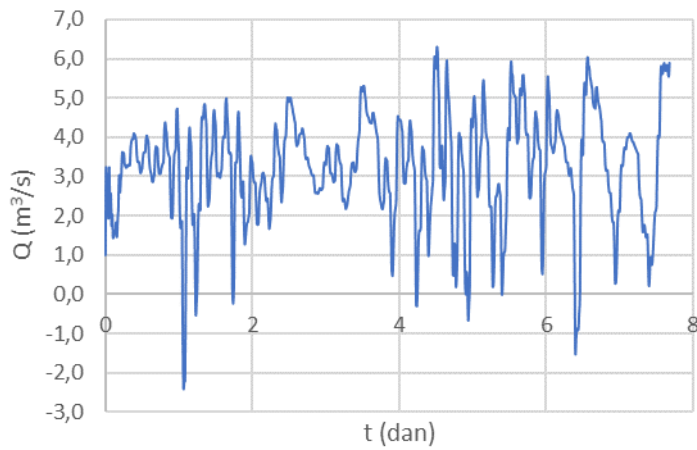
<b>Udio negativnog protoka</b>	0,68	%
--------------------------------	------	---

Slika 52. Krivulja trajanja protoka za 16. elementa



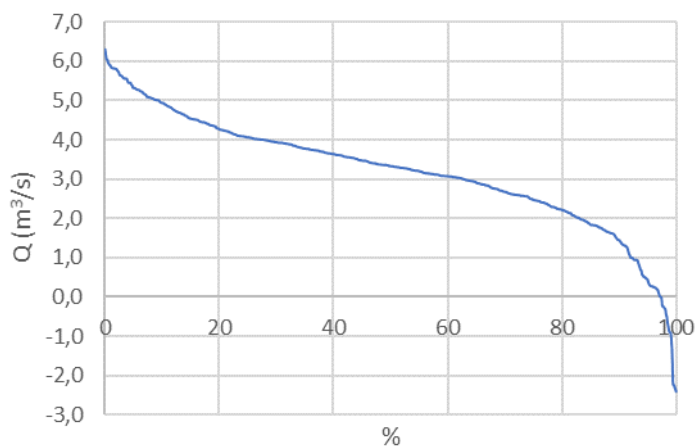
<b>Prosječna brzina</b>	0,049	m/s
<b>Minimalna brzina</b>	-0,011	m/s
<b>Maksimalna brzina</b>	0,073	m/s

Slika 53. Prikaz brzina u vremenu 16. elementa



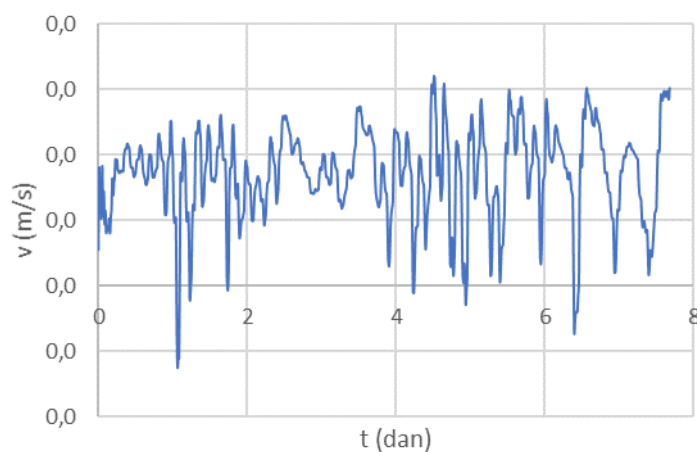
<b>Prosječni protok</b>	3,217	m <sup>3</sup> /s
<b>Minimalni protok</b>	-2,401	m <sup>3</sup> /s
<b>Maksimalni protok</b>	6,298	m <sup>3</sup> /s

Slika 54. Hidrogram 46. elementa



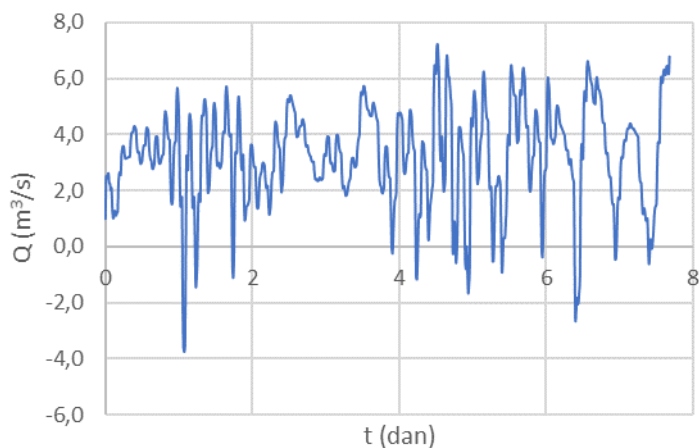
<b>Udio negativnog protoka</b>	2,57	%
--------------------------------	------	---

Slika 55. Krivulja trajanja protoka za 46. elementa



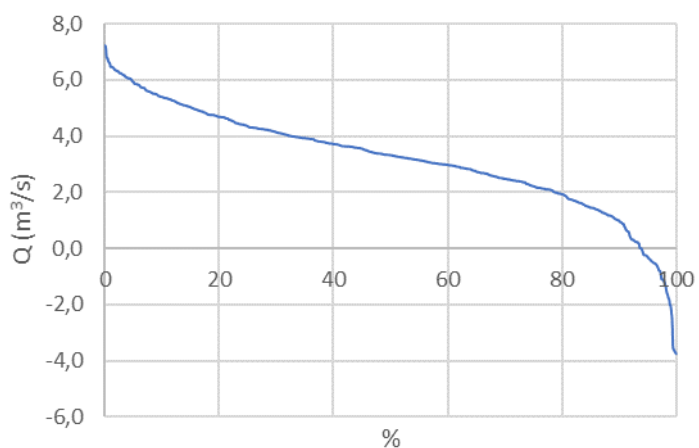
<b>Prosječna brzina</b>	0,009	m/s
<b>Minimalna brzina</b>	-0,006	m/s
<b>Maksimalna brzina</b>	0,016	m/s

Slika 56. Prikaz brzina u vremenu 46. elementa



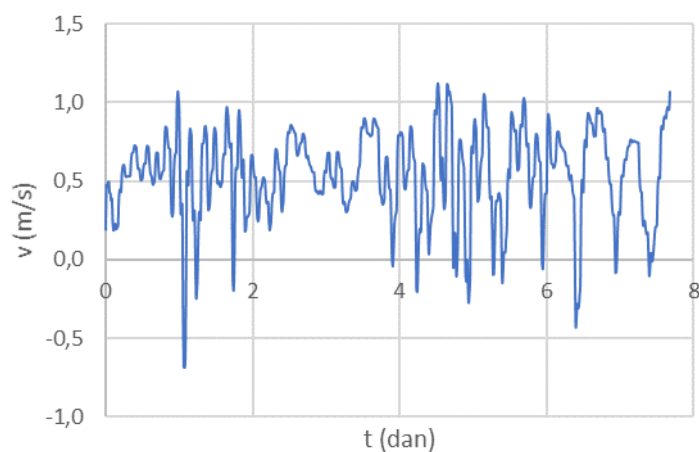
<b>Prosječni protok</b>	3,205	m <sup>3</sup> /s
<b>Minimalni protok</b>	-3,747	m <sup>3</sup> /s
<b>Maksimalni protok</b>	7,225	m <sup>3</sup> /s

Slika 57. Hidrogram 55. elementa



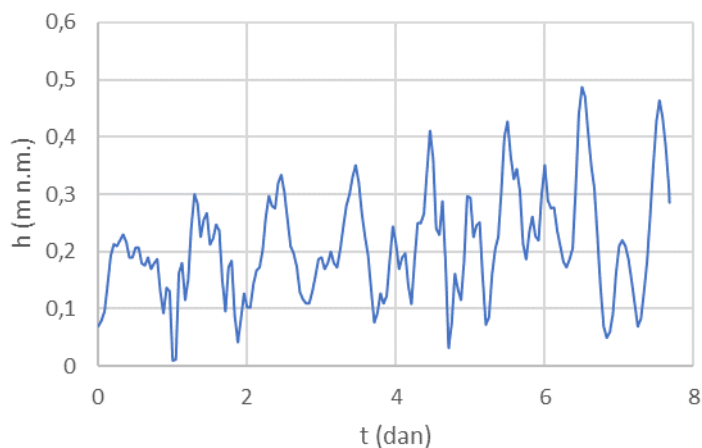
<b>Udio negativnog protoka</b>	5,83	%
--------------------------------	------	---

Slika 58. Krivulja trajanja protoka za 55. elementa



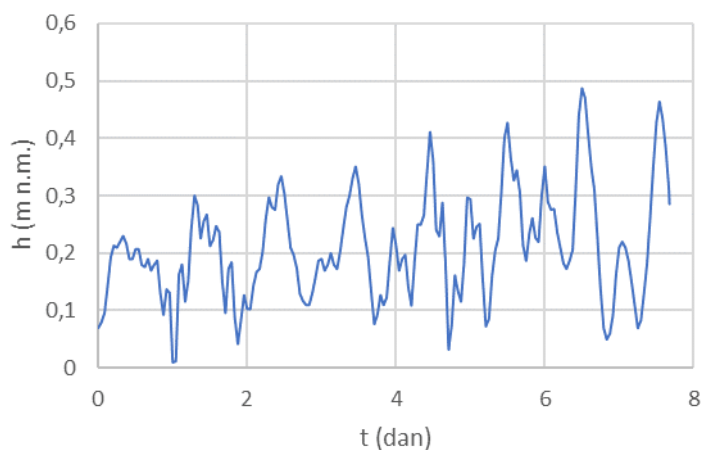
<b>Prosječna brzina</b>	0,537	m/s
<b>Minimalna brzina</b>	-0,685	m/s
<b>Maksimalna brzina</b>	1,122	m/s

Slika 59. Prikaz brzina u vremenu 55. elementa



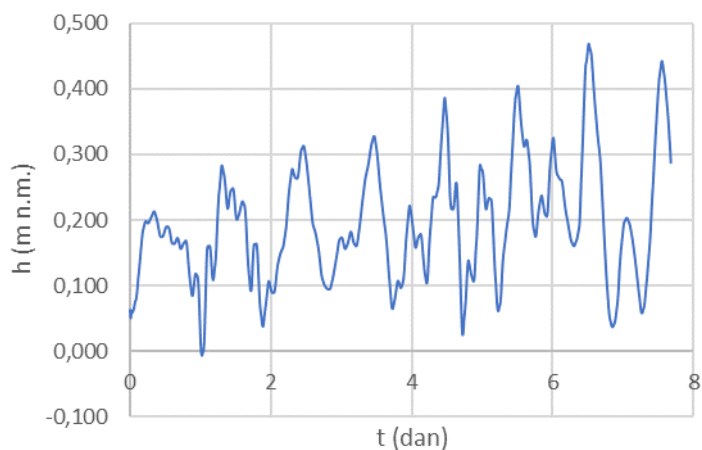
<b>Prosječna piezometarska visina</b>	0,211 m
<b>Minimalna piezometarska visina</b>	0,010 m
<b>Maksimalna piezometarska visina</b>	0,487 m

Slika 60. Nivogram 1. čvora



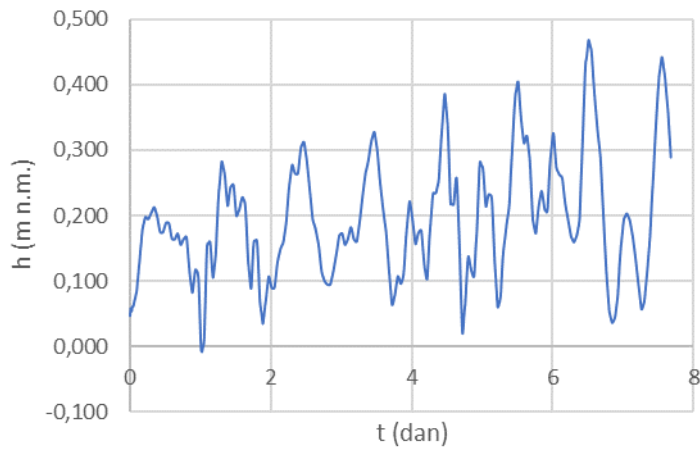
<b>Prosječna piezometarska visina</b>	0,211 m
<b>Minimalna piezometarska visina</b>	0,010 m
<b>Maksimalna piezometarska visina</b>	0,487 m

Slika 61. Nivogram 6. čvora



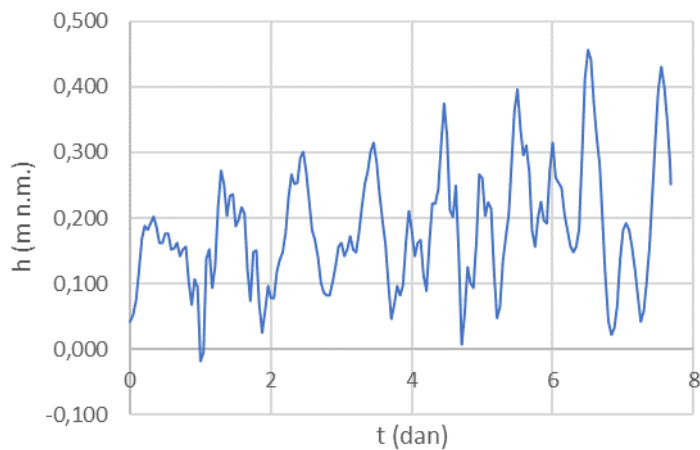
<b>Prosječna piezometarska visina</b>	0,196 m
<b>Minimalna piezometarska visina</b>	-0,007 m
<b>Maksimalna piezometarska visina</b>	0,469 m

Slika 62. Nivogram 16. čvora



<b>Prosječna piezometarska visina</b>	0,195	m
<b>Minimalna piezometarska visina</b>	-0,008	m
<b>Maksimalna piezometarska visina</b>	0,468	m

Slika 63. Nivogram 47. čvora



<b>Prosječna piezometarska visina</b>	0,183	m
<b>Minimalna piezometarska visina</b>	-0,018	m
<b>Maksimalna piezometarska visina</b>	0,456	m

Slika 64. Nivogram 56. čvora

## 5. RASPRAVA

Razine piezometarskih visina direktno ovise o rubnim uvjetima te se kod varijante 1 (Tablica 13) i kod varijante 2 (Tablica 14) jasno vidi postupni pad vodnog lica od ulaza do izlaza u sustav rukavaca.

Tablica 13 Vrijednosti piezometarskih visina na odabranim čvorovima za varijante 1

Čvor	Stacionaža	Minimalna piezo. visina (m n.m.)	Prosječna piezo. visina (m n.m.)	Maksimalna piezo. visina (m n.m.)
1	0+000,00	-0,069	0,198	0,484
6	0+500,00	-0,069	0,198	0,484
12	1+050,00	-0,079	0,184	0,468
40	4+400,00	-0,084	0,180	0,465
50	5+360,00	-0,092	0,174	0,456

Tablica 14 Vrijednosti piezometarskih visina na odabranim čvorovima za varijante 2

Čvor	Stacionaža	Minimalna piezo. visina (m n.m.)	Prosječna piezo. visina (m n.m.)	Maksimalna piezo. visina (m n.m.)
1	0+000,00	0,010	0,211	0,487
6	0+500,00	-0,006	0,196	0,468
16	1+400,00	-0,007	0,196	0,469
47	4+400,00	-0,008	0,195	0,468
56	5+360,00	-0,018	0,183	0,456

Vrijednosti protoka koje se pojavljuju u sustavu prikazani su za varijantu 1 (Tablica 15) i za varijantu 2 (Tablica 16). Vidljivo je kako se prosječni protoci na elementima razlikuju tek na drugu decimalu i to u obje varijante. Ono što se bitno razlikuje su ekstremi koji su se pojavili na elementima. Naime što se element nalazi bliže sredini sustava rukavaca, to su ekstremi manji. Do toga dolazi zbog tromosti sustava da reagira na promjene u glavnom toku Neretve (rubni uvjeti), što je element udaljeniji od ulaza ili izlaza u rukavce, to je utjecaj rubnih uvjeta manji.

Tablica 15 Vrijednosti protoka na odabranim elementima za varijante 1

Element	Stacionaža	Minimalni protok (m <sup>3</sup> /s)	Prosječni protok (m <sup>3</sup> /s)	Maksimalni protok (m <sup>3</sup> /s)
1	0+075,00	-3,058	1,557	3,958
6	0+550,00	-2,108	1,558	3,029
12	1+415,00	-0,989	1,559	2,139
40	4+450,00	-2,888	1,566	5,071
49	5+305,00	-4,440	1,568	6,679



Tablica 16 Vrijednosti protoka na odabranim elementima za varijante 2

Element	Stacionaža	Minimalni protok (m <sup>3</sup> /s)	Prosječni protok (m <sup>3</sup> /s)	Maksimalni protok (m <sup>3</sup> /s)
1	0+075,00	-2,578	3,273	6,049
6	0+550,00	-1,804	3,266	5,672
16	1+450,00	-0,719	3,256	5,262
46	4+450,00	-2,401	3,217	6,298
55	5+305,00	-3,747	3,205	7,225

Vrijednosti brzina koje se pojavljuju u sustavu prikazani su za varijantu 1 (Tablica 17) i za varijantu 2 (Tablica 18). Brzina na elementima ovisi isključivo o protoku i poprečnom presjeku elementa kroz koji se taj protok ostvari. Kako su protoci po elementima konzistentni, tada značajnu ulogu na vrijednost brzine ima površina poprečnog presjeka. Vrijednost površine poprečnog presjeka se znatno razlikuju (npr. površina poprečnog presjeka cijevi je 7,07 m<sup>2</sup>, a elementa na stacionaži 0+550,00 iznosi 517,84 m<sup>2</sup>).

Tablica 17 Vrijednosti brzina na odabranim elementima za varijante 1

Element	Stacionaža	Minimalna brzina (m/s)	Prosječna brzina (m/s)	Maksimalna brzina (m/s)
1	0+075,00	-0,598	0,258	0,651
6	0+550,00	-0,008	0,006	0,011
12	1+415,00	-0,140	0,221	0,303
40	4+450,00	-0,008	0,004	0,013
49	5+305,00	-0,782	0,267	1,178

Tablica 18 Vrijednosti brzina na odabranim elementima za varijante 2

Element	Stacionaža	Minimalna brzina (m/s)	Prosječna brzina (m/s)	Maksimalna brzina (m/s)
1	0+075,00	-0,496	0,540	0,889
6	0+550,00	-0,007	0,012	0,020
16	1+450,00	-0,011	0,049	0,073
46	4+450,00	-0,006	0,009	0,016
55	5+305,00	-0,685	0,537	1,122

Najvažniji podatak, za usporedbu varijante 1 i varijante 2, je vrijeme koje je potrebno čestici da pređe put od ulaza do izlaza u rukavac, odnosno to je vrijeme potrebno za potpunu izmjenu vode (Tablica 19). Kod varijante 1 to vrijeme je 55% veće nego kod varijante 2.

Tablica 19. Vrijeme potrebno za potpunu izmjenu vode

Varijanta 1 (cijev)	Varijanta 2 (kanal)
11.92 dana	7.68 dana

## 6. FORTRAN 95 PROGRAMSKO RJEŠENJE

### 6.1. PREDPROGRAM

```
program Predprogram
implicit none
real*8 STACPOC(100), STACKR(100), STAC(100), LEL(100), X(100,100), Y(100,100)
, YRAZ(100), HRAZ(100), HRAZC(100,100), deltac(100)
real*8
Bel(100), SIRINA(100,100), BB, B(100), AHOR(100,100), Bc(100), THETA, TT(1000)
, H1(1000), H2(1000)
real*8 MX(100), MN(100), delta(100), A(100), O(100), OO, AA, XX, C, toc, Hp(100,100)
, Ap(100,100), Cp(100,100)
real*8 start, finish
integer*4
i, j, k, KK(100), ICVUZV(100), ICVNIZ(100), ncvor, nel, N(100), nn, DT, NPIS, NDT
character*1 VRSTAEL(100)

call cpu_time(start)

open(unit=3, file='INPUT_rubni_uvjeti.dat', status='old')
open(unit=4, file='INPUT_osnovni_podaci.dat', status='old')
open(unit=5, file='INPUT.dat', status='old')
open(unit=6, file='INPUT_Z.dat', status='old')
open(unit=7, file='INPUT_K.dat', status='old')
open(unit=8, file='INPUT_C.dat', status='old')
open(unit=9, file='ULAZ.dat', status='replace')

do i=1,100
    read(5,*)
    ICVUZV(i), ICVNIZ(i), STACPOC(i), STAC(i), STACKR(i), LEL(i), KK(i), VRSTAEL(i)
        if(ICVUZV(i).lt.0.0) exit
enddo

ncvor=i
nel=ncvor-1

do i=1,nel
    if(VRSTAEL(i).eq.'Z') then
        do j=1,100
            read(6,*) Hp(i,j), Ap(i,j), Cp(i,j)
            if(Hp(i,j).lt.-99) exit
        enddo
    elseif(VRSTAEL(i).eq.'K') then
        do j=1,100
            read(7,*) X(i,j), Y(i,j)
            if(X(i,j).lt.0.0) exit
        enddo
    elseif(VRSTAEL(i).eq.'C') then
        do j=1,100
            read(8,*) Hp(i,j), Ap(i,j), Cp(i,j)
            if(Hp(i,j).lt.-99) exit
        enddo
    endif
    N(i)=j-1
enddo

do i=1,999
    read(3,*) TT(i), H1(i), H2(i)
    if(TT(i).lt.0.0) exit
```

```
enddo

!Unos osnovnih podataka za proračun-----
-----
! THETA-koeficijent parcijalne integracije
! DT-vremenski korak
! NPIS-broj vremenskih koraka koji se ispisuje
! NDT-broj vremenskih koraka

read(4,*) THETA,DT,NPIS
NDT=maxval(TT)/DT
write(9,'(f4.2,i4,i4,i10)') THETA,DT,NPIS,NDT

!Unos rubnih uvjeta-----
!H1(100) - peizometarska visina Neretve na ulazu u rukavac
!H2(100) - peizometarska visina Neretve na izlazu iz rukavac

write(9,'(i3)')i-1
do j=1,i-1
    write(9,'(f10.2,f10.4,f10.4)')TT(j),H1(j),H2(j)
enddo

!PRORACUN ELEMENATA (provodljivost)-----
write(9,41)nel,ncvor
41 format (i2,i3)
do i=1,nel
    write(9,50) i,ICVUZV(i),ICVNIZ(i),STAC(i),LEL(i),STACPOC(i),STACKR(i)
    50 format(i3,i3,i3,f10.2,f10.2,f10.2,f10.2)

    if(VRSTAEL(i).eq.'Z'.or.VRSTAEL(i).eq.'C')then
do j=1,N(i)
    write(9,51) Hp(i,j),Ap(i,j),Cp(i,j)
    51 format(f9.4,f20.4,f20.4)
enddo

    elseif(VRSTAEL(i).eq.'K')then
        MX(i)=Y(i,1)
        MN=minval(Y,DIM=2,MASK=Y.gt.0.0)
        delta(i)=(MX(i)-MN(i))/24.
        YRAZ(i)=Y(i,1)-(24.*delta(i))
        HRAZ(i)=2.5-(24.*delta(i))

        nn=N(i)-1
do k=1,25
    do j=1,nn
        if(YRAZ(i).gt.Y(i,j).and.YRAZ(i).gt.Y(i,j+1)) then
            A(j)=0.5*((YRAZ(i)-Y(i,j))+(YRAZ(i)-Y(i,j+1)))*(X(i,j+1)-X(i,j))
            O(j)=sqrt((X(i,j+1)-X(i,j))**2.+(Y(i,j+1)-Y(i,j))**2.)
        elseif(YRAZ(i).gt.Y(i,j).and.YRAZ(i).le.Y(i,j+1)) then
            XX=X(i,j)+((X(i,j+1)-X(i,j))/(Y(i,j+1)-Y(i,j)))*(YRAZ(i)-Y(i,j))
            A(j)=0.5*(YRAZ(i)-Y(i,j))*(XX-X(i,j))
            O(j)=sqrt((XX-X(i,j))**2.+(YRAZ(i)-Y(i,j))**2.)
        elseif(YRAZ(i).le.Y(i,j).and.YRAZ(i).gt.Y(i,j+1)) then
            XX=X(i,j)+((X(i,j+1)-X(i,j))/(Y(i,j+1)-Y(i,j)))*(YRAZ(i)-Y(i,j))
            A(j)=0.5*(YRAZ(i)-Y(i,j+1))*(X(i,j+1)-XX)
            O(j)=sqrt((XX-X(i,j+1))**2.+(YRAZ(i)-Y(i,j+1))**2.)
        elseif(YRAZ(i).le.Y(i,j).and.YRAZ(i).le.Y(i,j+1)) then
            A(j)=0.0
            O(j)=0.0
        endif
    end do
end do
```

```
AA=0.0
OO=0.0
      do j=1,nn
        AA=AA+A(j)
        OO=OO+O(j)
      end do
toc=0.00000001
if(AA.lt.toc.and.OO.lt.toc) then
  AA=0.0
  OO=0.0
  C=0.0
else
  C=KK(i)*((AA)**(5./3.))/(OO)**(2./3.)*sqrt(LEL(i))
endif
write(9,100) HRAZ(i),AA,C
100 format(f9.4,f20.4,f20.4)

YRAZ(i)=YRAZ(i)+delta(i)
HRAZ(i)=HRAZ(i)+delta(i)
end do
endif
end do

!PRORACUN CVOROVA (volumetrija)-----
do i=1,ncvor
  if(VRSTAEL(i).eq.'Z')then
    read(6,*) Bc(i),Bel(i),Bc(i+1)
  elseif(VRSTAEL(i).eq.'K')then
    MX(i)=Y(i,1)
    MN=minval(Y,DIM=2,MASK=Y.gt.0.0)
    delta(i)=(MX(i)-MN(i))/24.
    YRAZ(i)=Y(i,1)-(24.*delta(i))
    HRAZ(i)=2.5-(24.*delta(i))

    nn=N(i)-1
    do k=1,25
      do j=1,nn
        if(YRAZ(i).gt.Y(i,j).and.YRAZ(i).gt.Y(i,j+1)) then
          B(j)=X(i,j+1)-X(i,j)
        elseif(YRAZ(i).gt.Y(i,j).and.YRAZ(i).le.Y(i,j+1)) then
          XX=X(i,j)+(X(i,j+1)-X(i,j))/(Y(i,j+1)-Y(i,j))* (YRAZ(i)-Y(i,j))
          B(j)=XX-X(i,j)
        elseif(YRAZ(i).le.Y(i,j).and.YRAZ(i).gt.Y(i,j+1)) then
          XX=X(i,j)+(X(i,j+1)-X(i,j))/(Y(i,j+1)-Y(i,j))* (YRAZ(i)-Y(i,j))
          B(j)=X(i,j+1)-XX
        elseif(YRAZ(i).le.Y(i,j).and.YRAZ(i).le.Y(i,j+1)) then
          B(j)=0.0
        endif
      end do
    end do

    BB=0.0
    do j=1,nn
      BB=BB+B(j)
    enddo
    toc=0.00000001
    if(AA.lt.toc.and.OO.lt.toc) BB=0.0
    SIRINA(i,k)=BB
    YRAZ(i)=YRAZ(i)+delta(i)
  end do
```

```
elseif (VRSTAEL(i).eq.'C') then
    read(8,*) Bc(i),Bc(i+1)
endif
enddo

do i=1,ncvor
    if (VRSTAEL(i).eq.'Z') then
        MN=minval (Hp,DIM=2,MASK=Hp.gt.-99)
        delta(i)=(2.5-MN(i))/24.
        do j=1,25
            HRAZC(i,j)=MN(i)+delta(i)*(j-1)
        enddo
        do j=1,25
            HRAZC(i+1,j)=MN(i)+delta(i)*(j-1)
        enddo
    elseif (VRSTAEL(i).eq.'K') then
        if (VRSTAEL(i+1).ne.'K') goto 10
        HRAZC(i+1,1)=2.5-24.*delta(i)-(24.*delta(i+1)-24.*delta(i))*
            (STAC(i+1)-STACPOC(i+1))/(STACKR(i+1)-
            STACPOC(i+1))
        deltac(i+1)=(2.5-HRAZC(i+1,1))/24.
        do j=1,25
            HRAZC(i+1,j)=HRAZC(i+1,1)+deltac(i+1)*(j-1)
        enddo
        10 continue
    elseif (VRSTAEL(i).eq.'C') then
        MN=minval (Hp,DIM=2,MASK=Hp.gt.-99)
        delta(i)=(2.5-MN(i))/24.
        do j=1,25
            HRAZC(i,j)=MN(i)+delta(i)*(j-1)
        enddo
        do j=1,25
            HRAZC(i+1,j)=MN(i)+delta(i)*(j-1)
        enddo
    endif
enddo

do i=1,ncvor
    if (i.eq.1) then
        do j=1,25
            AHOR(i,j)=(Bel(i)+Bc(i))/2*(STAC(i)-STACPOC(i))+
                Bc(i)*50
        enddo
    elseif (i.eq.2) then
        do j=1,25
            AHOR(i,j)=(Bel(i-1)+Bc(i))/2*(STACPOC(i)-STAC(i-1))+
                (Bc(i)+SIRINA(i,j))/2*(STAC(i)-STACPOC(i))
        enddo
    elseif (VRSTAEL(i).eq.'C') then
        do j=1,25
            AHOR(i,j)=(Bc(i)+SIRINA(i-1,j))/2*(STACPOC(i)-STAC(i-1))
        enddo
    elseif (VRSTAEL(i-1).eq.'C') then
        do j=1,25
            AHOR(i,j)=(Bc(i)+SIRINA(i+1,j))/2*(STAC(i)-STACPOC(i))
        enddo
    elseif (i.eq.(ncvor-1)) then
        do j=1,25
            AHOR(i,j)=(Bel(i)+Bc(i))/2*(STAC(i)-STACPOC(i))+
                (Bc(i)+SIRINA(i-1,j))/2*(STACPOC(i)-STAC(i-1))
        enddo
    enddo
```

```
elseif(i.eq.ncvor) then
  do j=1,25
    AHOR(i,j)=(Bel(i-1)+Bc(i))/2*(STACKR(i-1)-STAC(i-1))+Bc(i)*50
  enddo
else
  do j=1,25
    AHOR(i,j)=((SIRINA(i-1,j)+SIRINA(i,j))/2.)*abs(STAC(i-1)-STAC(i))/2
  enddo
endif
enddo

do i=1,ncvor
  if(i.eq.ncvor) then
    write(9,'(i3,f10.2)') i,STACKR(i-1)
  else
    write(9,'(i3,f10.2)') i,STACPOC(i)
  endif

  do j=1,25
    write(9,'(f10.4,f20.4)') HRAZC(i,j), AHOR(i,j)
  enddo
enddo

!Protoci u svakom cvoru
do i=1,ncvor
  write(9,'(1x,f3.1)',ADVANCE='NO')0.0
end do

call cpu_time(finish)
write(*,1("Vrijeme proracuna = ",f10.2," s = ",f10.2," min = ",f10.2," h")) (finish-start), (finish-start)/60, (finish-start)/60/60
end program
```

## 6.2. GLAVNI PROGRAM

```
PROGRAM GlavniProgram
IMPLICIT NONE
! ELMI(i,j)-matrica koja za svaki i-element sadrzava j-
vrijednosti(IEL,ICVORUZ,ICVORNIZ)
!IEL-broj elementa i)
!ICVORUZ-broj uzvodnog cvora elemnta i)
!ICVORNIZ-broj nizvodnog cvora elementa i)
! ELMR(i,j)-matrica koja za svaki i-element sadrzava j-vrijednosti
(STAC,LEL,STACPOC,STACKR)
!STAC-stacionaza elementa i(sredina elementa)
!LEL-duljina elementa i
!STACPOC-stacionaza pocetka elementa i
!STAC-stacionaza kraja elementa i
! HEL(i,j)-matrica koja za svaki i-element sadrzava nadmorske visine
elementa
! AEL(i,j)-matrica koja za svaki i-element sadrzava omocene površine
poprecnog presjeka elementa
! CH(i,j)-matrica koja za svaki i-element sadrzava provodljivost C
poprecnog presjeka elementa
! NEL-broj elemenata
! NCVOR-broj cvorova
! CVSTAC(i)-matrica koja za svaki i-cvor sadrzava stacionazu
! CVOR(i)-matrica koja za svaki i-cvor sadrzava broj cvora
! HCV(i,j)-matrica koja za svaki i-cvor sadrzava nadmorske visine
! AH(i,j)-matrica koja za svaki i-cvor sadrzava horizontalne površine
! FGLOB(I,J)-globalna matrica sa NEL+NCVOR redaka i stupaca
! THETA-koeficijent parcijalne integracije
! DT-vremenski korak
! NDT-broj vremenskih koraka
! NPIS-broj vremenskih koraka koji se ispisuje
! DATPOC-pocetna datoteka u koju se zapisuju ime ulazne i izlazne datoteke
u formatu "ime.DAT"
! DATULAZ-ulazna datoteka koja sadrzi podatke potrebne za proracun
! DATIZLAZ-izlazna datoteka u koju ce se zapisivati rjesenje
! RR i R1-pomocne varijable kojima kontroliramo broj vremenskih koraka koje
cemo zapisivati
! Vu-volumen vode koji ulazi u rukavac
! Vi-volumen vode koji ulazi u rukavac
! xc-polozaj cestice

COMMON/B1/ ELMR(100,4),HEL(100,25),AEL(100,25),CH(100,25),ELMI(100,3),NEL,
HREZ(5000,100),QREZ(5000,100)
COMMON/B2/
VSTAC(100),CVOR(100),HCV(100,25),AH(100,25),NCVOR,THETA,DT,NPIS,NDT,
Q0(100),TT(1000),NCIT,HH1(1000),HH2(1000)
COMMON/B3/ DATULAZ,DATIZLAZ_hQv,DATIZLAZ_h,DATIZLAZ_Q,DATIZLAZ_v,DATIZLAZ,
DATIZLAZ_xcV
REAL*8 ELMR,HEL,AEL,CH,CVSTAC,HCV,AH,R1,Q1(100),H1(100),RPIS,T1,T2,Q0,TT,
Q2(100),H2(100),TOC,DT,THETA,HREZ,QREZ,HH1,HH2
REAL*8 DH2,HSR2,A2,INTP,V2(100),V1(100),F(99),xc,Vu,Vi,V
real*8 start, finish
INTEGER*8 ELMI,NEL,NCVOR,CVOR,NDT,RR,I,J,K,NPIS,NCIT,N
integer*8
DATULAZ,DATIZLAZ_hQv,DATIZLAZ_h,DATIZLAZ_Q,DATIZLAZ_v,DATIZLAZ,DATIZLAZ_xcV

call cpu_time(start)
```

```
CALL
OTVORI (DATULAZ, DATIZLAZ_hQv, DATIZLAZ_h, DATIZLAZ_Q, DATIZLAZ_v, DATIZLAZ, DATIZ
LAZ_xcV)
CALL CITANJE ()
T1=0.0
CALL POCSTANJE (Q1, H1, V1)
RPIS=FLOAT (NPIS)

write (DATIZLAZ_h, 405, ADVANCE='NO') T1
write (DATIZLAZ_Q, 405, ADVANCE='NO') T1
write (DATIZLAZ_v, 405, ADVANCE='NO') T1
405 FORMAT (F12.1)
DO I=1, NCVOR
    write (DATIZLAZ_h, 406, ADVANCE='NO') H1 (I)
    406 FORMAT (F10.5)
END DO
DO I=1, NEL
    write (DATIZLAZ_Q, 407, ADVANCE='NO') Q1 (I)
    407 FORMAT (F13.5)
END DO
DO I=1, NEL
    write (DATIZLAZ_v, 408, ADVANCE='NO') V1 (I)
    408 FORMAT (F13.5)
END DO
WRITE (DATIZLAZ_h, *) ''
WRITE (DATIZLAZ_Q, *) ''
WRITE (DATIZLAZ_v, *) ''

xc=0.0
Vu=0.0
Vi=0.0
V=0.0
do i=1, nel
    V=Q1 (i) /V1 (i) *ELMR (I, 2) +V
end do

!Glavni dio programa-----
DO I=1, NDT
    T2=T1+DT
    call SIM (Q1, H1, Q2, H2, T2, F)

    DO J=1, NEL
        DH2=ABS (H2 (ELMI (J, 2)) -H2 (ELMI (J, 3))) /2
        IF (H2 (ELMI (J, 2)) .GT. H2 (ELMI (J, 3))) THEN
            HSR2=H2 (ELMI (J, 2)) -DH2
        ELSE
            HSR2=H2 (ELMI (J, 2)) +DH2
        END IF
        N=25
        A2=INTP (N, HEL, AEL, HSR2, J)
        V2 (J) =Q2 (J) /A2
    END DO

!gibanje cestice
if (xc.lt.ELMR (nel, 4)) then
    k=1
    do while ((ELMR (k, 4) -xc) .lt. 0.0)
        k=k+1
    end do
    xc=xc+V1 (k) *dt/2+V2 (k) *dt/2
else
```



```
    go to 300
end if

!volumen vode koji ulazi u rukavac
Vu=Vu+Q1(1)*dt/2.0+Q2(1)*dt/2.0
!volumen vode koji ulazi u rukavac
Vi=Vi+Q1(nel)*dt/2.0+Q2(nel)*dt/2.0

!Zapis stanja u svakom vremenskom koraku
RR=FLOAT(I/NPIS)
R1=FLOAT(I)/RPIS
TOC=1E-8
IF (ABS(RR-R1).LE.TOC) THEN
    WRITE(*,'(a10,i10,a4)') 'Vrijeme T',I*5/60,' min'
    write(DATIZLAZ_h,405,ADVANCE='NO') T2
    write(DATIZLAZ_Q,405,ADVANCE='NO') T2
    write(DATIZLAZ_v,405,ADVANCE='NO') T2
    write(DATIZLAZ_xcV,405,ADVANCE='NO') T2
    DO J=1,NCVOR
        write(DATIZLAZ_h,406,ADVANCE='NO') H2(J)
    END DO
    DO J=1,NEL
        write(DATIZLAZ_Q,407,ADVANCE='NO') Q2(J)
    END DO
    DO J=1,NEL
        write(DATIZLAZ_v,408,ADVANCE='NO') V2(J)
    END DO
    write(DATIZLAZ_xcV,'(f12.2,f15.2,f15.2)',ADVANCE='NO') xc,Vu,Vi

    WRITE(DATIZLAZ_h,*) ''
    WRITE(DATIZLAZ_Q,*) ''
    WRITE(DATIZLAZ_v,*) ''
    WRITE(DATIZLAZ_xcV,*) ''
END IF

DO K=1,NEL
    Q1(K)=Q2(K)
END DO
DO K=1,NCVOR
    H1(K)=H2(K)
END DO
T1=T2

END DO
300 continue

write(DATIZLAZ,'(a60,f11.2,a5)') 'Vrijeme trajanja putovanja cestice= ',
,t1/60/60/24,' dan'
write(DATIZLAZ,'(a60,f11.2,a5)') 'Put koji je cestica prosla od ulaza u
rukavac iznosi= ',xc,' m1'
write(DATIZLAZ,'(a60,f11.2,a5)') 'Volumen vode koji ulazi u rukavac= ',Vu,'
m3'
write(DATIZLAZ,'(a60,f11.2,a5)') 'Volumen vode koji izlazi iz rukavca=
',Vi,' m3'
write(DATIZLAZ,'(a60,f11.2,a5)') 'Volumen vode koji se nalazi u rukavcu=
',V,' m3'

call cpu_time(finish)
write(*,'("Vrijeme proracuna = ",f10.2," s = ",f10.2," min = ",f10.2,"
h")') (finish-start),(finish-start)/60,(finish-start)/60/60
```

```
write(DATIZLAZ,'(/,a60,f11.2,a5)') 'Vrijeme trajanja proračuna',(finish-  
start)/60,' min'  
END PROGRAM
```

```
!-----  
SUBROUTINE  
OTVORI (DATULAZ, DATIZLAZ_hQv, DATIZLAZ_h, DATIZLAZ_Q, DATIZLAZ_v, DATIZLAZ, DATIZ  
LAZ_xcV)  
IMPLICIT NONE  
integer*8  
DATULAZ, DATIZLAZ_hQv, DATIZLAZ_h, DATIZLAZ_Q, DATIZLAZ_v, DATIZLAZ, DATIZLAZ_xcV  
  
DATULAZ=5  
DATIZLAZ_hQv=6  
DATIZLAZ_h=7  
DATIZLAZ_Q=8  
DATIZLAZ_v=9  
DATIZLAZ=10  
DATIZLAZ_xcV=11  
  
OPEN (UNIT=DATULAZ, FILE='ulaz.dat', STATUS='OLD')  
WRITE (*, *) 'OTVORENA ULAZNA DATOTEKA S ULAZNIM PODATCIMA'  
OPEN (UNIT=DATIZLAZ_hQv, FILE='Rjesenje_h,Q,v.dat', STATUS='REPLACE')  
WRITE (*, *) 'OTVORENA IZLAZNA DATOTEKA U KOJU SE ISPISUJE RJESENJE h,Q,v'  
OPEN (UNIT=DATIZLAZ_h, FILE='Rjesenje_h.dat', STATUS='REPLACE')  
WRITE (*, *) 'OTVORENA IZLAZNA DATOTEKA U KOJU SE ISPISUJE RJESENJE h'  
OPEN (UNIT=DATIZLAZ_Q, FILE='Rjesenje_Q.dat', STATUS='REPLACE')  
WRITE (*, *) 'OTVORENA IZLAZNA DATOTEKA U KOJU SE ISPISUJE RJESENJE Q'  
OPEN (UNIT=DATIZLAZ_v, FILE='Rjesenje_v.dat', STATUS='REPLACE')  
WRITE (*, *) 'OTVORENA IZLAZNA DATOTEKA U KOJU SE ISPISUJE RJESENJE v'  
OPEN (UNIT=DATIZLAZ, FILE='Rjesenje.dat', STATUS='REPLACE')  
WRITE (*, *) 'OTVORENA IZLAZNA DATOTEKA'  
OPEN (UNIT=DATIZLAZ_xcV, FILE='Rjesenje_xcV.dat', STATUS='OLD')  
WRITE (*, *) 'OTVORENA IZLAZNA DATOTEKA U KOJU SE ISPISUJE RJESENJE xc,Vu,Vi'  
  
END SUBROUTINE
```

```
!-----  
SUBROUTINE CITANJE()  
IMPLICIT NONE  
! THETA-koeficijent parcijalne integracije  
! DT-vremenski korak  
! NPIS-broj vremenskih koraka koji se ispisuje  
! NDT-broj vremenskih koraka  
! NCIT - broj podataka kojim se definira krivulja plime i oseke  
! Q0(100) - matrica ulaznih protoka u prvi cvor  
! HH1(150) - peizometarska visina na ulazu u rukavac  
! HH2(150) - peizometarska visina na izlazu iz rukavca  
! TT(150) - svakom TTi pridružena je jedna vrijednost HHi  
  
COMMON/B1/ ELMR(100,4), HEL(100,25), AEL(100,25), CH(100,25), ELMI(100,3), NEL,  
HREZ(5000,100), QREZ(5000,100)  
COMMON/B2/  
VSTAC(100), CVOR(100), HCV(100,25), AH(100,25), NCVOR, THETA, DT, NPIS, NDT,  
Q0(100), TT(1000), NCIT, HH1(1000), HH2(1000)  
COMMON/B3/ DATULAZ, DATIZLAZ_hQv, DATIZLAZ_h, DATIZLAZ_Q, DATIZLAZ_v, DATIZLAZ,  
DATIZLAZ_xcV  
REAL*8 ELMR, HEL, AEL, CH, CVSTAC, HCV, AH, THETA, DT, Q0, TT, HREZ, QREZ, HH1, HH2  
INTEGER*8 ELMI, NEL, NCVOR, IEL, J, K, L, ICVOR, CVOR, NPIS, NDT, NCIT, I  
integer*8 DATULAZ, DATIZLAZ_hQv, DATIZLAZ_h, DATIZLAZ_Q, DATIZLAZ_v, DATIZLAZ,  
DATIZLAZ_xcV
```

```
READ(DATULAZ,*) THETA,DT, NPIS, NDT
READ(DATULAZ,*) NCIT
DO I=1,NCIT
  READ(DATULAZ,*) TT(I),HH1(I),HH2(I)
END DO
READ(DATULAZ,*) NEL, NCVOR
DO IEL=1,NEL
  READ(DATULAZ,*) (ELMI(IEI,J),J=1,3) , (ELMR(IEI,K),K=1,4)
  DO L=1,25
    READ(DATULAZ,*) HEL(IEI,L), AEL(IEI,L), CH(IEI,L)
  END DO
END DO

DO ICVOR=1,NCVOR
  READ(DATULAZ,*) CVOR(ICVOR) , CVSTAC(ICVOR)
  DO L=1,25
    READ(DATULAZ,*) HCV(ICVOR,L), AH(ICVOR,L)
  END DO
END DO
READ(DATULAZ,*) (Q0(I),I=1,NCVOR)
END SUBROUTINE
!-----
SUBROUTINE POCSTANJE(Q1,H1,V1)
IMPLICIT NONE
!LUK - ukupna duljina svih elementat
COMMON/B1/ ELMR(100,4),HEL(100,25),AEL(100,25),CH(100,25),ELMI(100,3),NEL,
HREZ(5000,100),QREZ(5000,100)
COMMON/B2/
VSTAC(100),CVOR(100),HCV(100,25),AH(100,25),NCVOR,THETA,DT, NPIS, NDT,
Q0(100),TT(1000),NCIT,HH1(1000),HH2(1000)
COMMON/B3/ DATULAZ,DATIZLAZ_hQv,DATIZLAZ_h,DATIZLAZ_Q,DATIZLAZ_v,DATIZLAZ,
DATIZLAZ_xcV
REAL*8
ELMR,HEL,AEL,CH,CVSTAC,HCV,AH,THETA,DT,Q0,Q1(100),DH(100),H1(100),TT,LUK
REAL*8 HREZ,QREZ,DH1,HSR1,A1,INTP,V1(100),DHUK,NAGIB,HH1,HH2
INTEGER*8 ELMI,NEL,NCVOR,CVOR, NPIS, NDT, I,NCIT,N
integer*8
DATULAZ,DATIZLAZ_hQv,DATIZLAZ_h,DATIZLAZ_Q,DATIZLAZ_v,DATIZLAZ,DATIZLAZ_xcV

DO I=1,NEL
  Q1(I)=1.0
END DO

LUK=0.0
DO I=1,NEL
  LUK=LUK+ELMR(I,2)
END DO
H1(NCVOR)=HH2(1)
H1(1)=HH1(1)
DHUK=ABS(H1(NCVOR)-H1(1))
NAGIB=DHUK/LUK
DO I=1,NEL
  DH(I)=ELMR(I,2)*NAGIB
END DO
DO I=2,NCVOR-1
  IF(H1(1).GT.H1(NCVOR)) THEN
    H1(I)=H1(I-1)-DH(I)
  ELSE
    H1(I)=H1(I-1)+DH(I)
  END IF
```

```
END DO

DO I=1,NEL
DH1=ABS(H1(ELMI(I,2))-H1(ELMI(I,3)))/2
  IF(H1(ELMI(I,2)).GT.H1(ELMI(I,3))) THEN
    HSR1=H1(ELMI(I,2))-DH1
  ELSE
    HSR1=H1(ELMI(I,2))+DH1
  END IF
N=25
A1=INTP(N,HEL,AEL,HSR1,I)
V1(I)=Q1(I)/A1
END DO
END SUBROUTINE
!-----
SUBROUTINE SIM(Q1,H1,Q2,H2,T2,F)
IMPLICIT NONE

!INTP-funkcija interpolacije
!CH1-interpolirana vrijednost provodljivosti elementa na pocetku vremenskog
koraka
!CH2-interpolirana vrijednost provodljivosti elementa na kraju vremenskog
koraka
!AEL1-interpolirana vrijednost omocene površine poprečnog presjeka elementa
na pocetku vremenskog koraka
!AEL2-interpolirana vrijednost omocene površine poprečnog presjeka elementa
na kraju vremenskog koraka
!DFDQ(i)-derivacija funkcije F po portoku na elementu i
!DFDHUZ(I)-derivacija funkcije F po piezometarskoj visini uzvodnog cvora
elementa i
!DFDHNIZ(I)-derivacija funkcije F po piezometarskoj visini nizvodnog cvora
elementa i

COMMON/B1/ ELMR(100,4),HEL(100,25),AEL(100,25),CH(100,25),ELMI(100,3),NEL,
HREZ(5000,100),QREZ(5000,100)
COMMON/B2/
VSTAC(100),CVOR(100),HCV(100,25),AH(100,25),NCVOR,THETA,DT,NPIS,NDT,
Q0(100),TT(1000),NCIT,HH1(1000),HH2(1000)
COMMON/B3/ DATULAZ,DATIZLAZ_hQv,DATIZLAZ_h,DATIZLAZ_Q,DATIZLAZ_v,DATIZLAZ,
DATIZLAZ_xcV
REAL*8
ELMR,HEL,AEL,CH,CVSTAC,HCV,AH,THETA,INTP,CH1,CH2,AEL1,AEL2,DFDQ(200),
DFDQC(200),DFDHUZ(200),DFDHNIZ(200),TOCN,HREZ,QREZ
REAL*8
AHNIZ1,AHNIZ2,AHUZ1,AHUZ2,DELTAH1,DELTAH2,HSRED1,HSRED2,HUINT1,HUINT2,
HNINT1,HNINT2,Q1(100),Q2(100),H1(100),H2(100),HH1,HH2
REAL*8 HINT1,HINT2,AH1,AH2,TT,Q0,Q01(100),Q02(100),T2,INTP2,DT,FAK
REAL*8 FGLOB(99,99),F(99)
INTEGER*8 ELMI,NEL,NCVOR,CVOR,I,J,NDT,ITER,K,NPIS,N,NCIT,L
INTEGER*4 NJED
integer*8 DATULAZ,DATIZLAZ_hQv,DATIZLAZ_h,DATIZLAZ_Q,DATIZLAZ_v,DATIZLAZ,
DATIZLAZ_xcV

FAK=1.0
TOCN=0.00001
ITER=0
!PRETPOSTAVKA POCETNOG STANJA PROTOKA I PIEZ. VISINE U TRENUTKU K+1
DO I=1,NEL
  Q2(I)=Q1(I)
END DO
```

```
DO I=1,NCVOR
  H2(I)=H1(I)
END DO
H2(1)=INTP2(NCIT,TT,HH1,T2)
H2(NCVOR)=INTP2(NCIT,TT,HH2,T2)

200 CONTINUE
ITER=ITER+1
IF(ITER.gt.100) THEN
  WRITE(*,101)
  101 FORMAT('U SUBROUTINI "SIM" BROJ ITERACIJA VECI OD 100')
  GO TO 201
END IF

!NULIRANJE MATRICE
DO K=1,NEL+NCVOR
  DO L=1,NEL+NCVOR
    FGLOB(K,L)=0.0
  END DO
  F(K)=0.0
END DO

DO I=1,NEL
  N=25 !BROJ PODATAKA IZMEDU KOJIH INTERPOLIRAMO TRAZENE VRIJEDNOSTI
  DELTAH1=ABS(H1(ELMI(I,2))-H1(ELMI(I,3)))/2
  IF(H1(ELMI(I,2)).GT.H1(ELMI(I,3))) THEN
    HSRED1=H1(ELMI(I,2))-DELTAH1
  ELSE
    HSRED1=H1(ELMI(I,2))+DELTAH1
  END IF
  DELTAH2=ABS(H2(ELMI(I,2))-H2(ELMI(I,3)))/2
  IF(H2(ELMI(I,2)).GT.H2(ELMI(I,3))) THEN
    HSRED2=H2(ELMI(I,2))-DELTAH2
  ELSE
    HSRED2=H2(ELMI(I,2))+DELTAH2
  END IF

  CH1=INTP(N,HEL,CH,HSRED1,I)
  CH2=INTP(N,HEL,CH,HSRED2,I)
  AEL1=INTP(N,HEL,AEL,HSRED1,I)
  AEL2=INTP(N,HEL,AEL,HSRED2,I)

! DINAMICKA JEDNADZBA ZA I-TI ELEMENT
  F(I)=Q2(I)-Q1(I)-((1.0-THETA)*DT*(H1(ELMI(I,2))-H1(ELMI(I,3)))-
  ((ABS(Q1(I))*Q1(I))/(CH1**2.0)))*((9.81*AEL1)/ELMR(I,2))) &
  -(THETA*DT*(H2(ELMI(I,2))-H2(ELMI(I,3)))-
  ((ABS(Q2(I))*Q2(I))/(CH2**2.0)))*((9.81*AEL2)/ELMR(I,2)))
! DERIVACIJA I-TE JEDNADZBE PO Q(I)K+1
  DFDQ(I)=1.0+THETA*DT*((2.0*Q2(I))/(CH2**2.0))*((9.81*AEL2)/ELMR(I,2))
! DERIVACIJA I-TE JEDNADZBE PO H K+1 U NIZVODNOM CVORU
  DFDHNI(I)=THETA*DT*((9.81*AEL2)/ELMR(I,2))
! DERIVACIJA I-TE JEDNADZBE PO H K+1 U UZVODNOM CVORU
  DFDHUZ(I)=- (THETA*DT*((9.81*AEL2)/ELMR(I,2)))

! SLAGANJE ELEMENTNIH (DINAMICKIH) JEDNADZBI U GLOBALNU MATRICU
  FGLOB(I,I)=DFDQ(I)
  FGLOB(I,NEL+ELMI(I,3))=FGLOB(I,NEL+ELMI(I,3))+DFDHNIZ(I)
  FGLOB(I,NEL+ELMI(I,2))=FGLOB(I,NEL+ELMI(I,2))+DFDHUZ(I)

! JEDNADZBE KONTINUITETA ZA J-TI CVOR
```

```
! DOPRINOS UZVODNOG CVORA ELEMENTA I
  HUINT1=H1 (ELMI ( I , 2 ) )
  HUINT2=H2 (ELMI ( I , 2 ) )
  K=ELMI ( I , 2 )
  AHUZ1=INTP ( N , HCV , AH , HUINT1 , K )
! IF (AHUZ1.EQ.0.0) AHUZ1=0.000001
  AHUZ2=INTP ( N , HCV , AH , HUINT2 , K )
! IF (AHUZ2.EQ.0.0) AHUZ2=0.000001
  F (NEL+ELMI ( I , 2 ) )=F (NEL+ELMI ( I , 2 ) )+ ( ( ( 1.0-
THETA ) *DT*Q1 ( I ) ) /AHUZ1) + ( (THETA*DT*Q2 ( I ) ) /AHUZ2) )
! DERIVACIJA F (NEL+J) PO Q (I)
  DFDQC (NEL+ELMI ( I , 2 ) ) = (THETA*DT) /AHUZ2

! NIZVODNI CVOR ELEMENTA I
  HNINT1=H1 (ELMI ( I , 3 ) )
  HNINT2=H2 (ELMI ( I , 3 ) )
  K=ELMI ( I , 3 )
  AHNIZ1=INTP ( N , HCV , AH , HNINT1 , K )
! IF (AHNIZ1.EQ.0.0) AHNIZ1=0.000001
  AHNIZ2=INTP ( N , HCV , AH , HNINT2 , K )
! IF (AHNIZ2.EQ.0.0) AHNIZ2=0.000001
  F (NEL+ELMI ( I , 3 ) )=F (NEL+ELMI ( I , 3 ) ) - ( ( 1.0-THETA ) *DT*Q1 ( I ) ) /AHNIZ1) -
( (THETA*DT*Q2 ( I ) ) /AHNIZ2)
! FPOM=F (NEL+ELMI ( I , 3 ) )
! DERIVACIJA F (NEL+J) PO Q (I)
  DFDQC (NEL+ELMI ( I , 3 ) ) = - (THETA*DT) /AHNIZ2

! SLAGANJE CVORNIH JEDNADZBI U GLOBALNU MATRICU
  FGLOB (NEL+ELMI ( I , 2 ) , NEL+ELMI ( I , 2 ) )=1.0
  FGLOB (NEL+ELMI ( I , 3 ) , NEL+ELMI ( I , 3 ) )=1.0
  FGLOB (NEL+ELMI ( I , 2 ) , I )=FGLOB (NEL+ELMI ( I , 2 ) , I )+DFDQC (NEL+ELMI ( I , 2 ) )
  FGLOB (NEL+ELMI ( I , 3 ) , I )=FGLOB (NEL+ELMI ( I , 3 ) , I )+DFDQC (NEL+ELMI ( I , 3 ) )
END DO

!DODAVANJE VANJSKOG PRIRASTA PROTOKA U POJEDINE CVOROVE
DO J=1, NCVOR
  HINT1=H1 ( J )
  HINT2=H2 ( J )
  AH1=INTP ( N , HCV , AH , HINT1 , J )
  AH2=INTP ( N , HCV , AH , HINT2 , J )
  Q01 ( J )=Q0 ( J )
  Q02 ( J )=Q0 ( J )
  F (NEL+J)=F (NEL+J) +H2 ( J ) -H1 ( J ) - ( ( 1-THETA ) *DT*Q01 ( J ) /AH1) -
(THETA*DT*Q02 ( J ) /AH2)
END DO

!PRISILNI RUBNI UVJET - PIEZOMETARSKA VISINA U RUBNIM CVOROVIMA
J=1
DO I=1, NEL+NCVOR
  FGLOB (NEL+J, I) =0.0
END DO
FGLOB (NEL+J, NEL+J) =1.0
F (NEL+J) =0.0
J=NCVOR
DO I=1, NEL+NCVOR
  FGLOB (NEL+J, I) =0.0
END DO
FGLOB (NEL+J, NEL+J) =1.0
F (NEL+J) =0.0
```

```
DO I=1,NEL+NCVOR
  F(I)=-F(I)
END DO

NJED=NEL+NCVOR

CALL SOLVER(FGLOB,F,NJED) ! FGLOB(I,J)-globalna matrica sa NEL+NCVOR redaka
i stupaca

DO I=1,NEL
Q2(I)=Q2(I)+FAK*F(I)
END DO
DO I=1,NCVOR
H2(I)=H2(I)+FAK*F(NEL+I)
END DO

DO I=1,NEL
IF(ABS(F(I)).GT.TOCN) GO TO 200
END DO
DO I=1,NCVOR
IF(ABS(F(NEL+I)).GT.TOCN) GO TO 200
END DO

201 CONTINUE
END SUBROUTINE
```

```
!-----
FUNCTION INTP(N,X,Y,XX,I)
IMPLICIT NONE
REAL*8 X(100,25),Y(100,25),XX,INTP,A,B,C,D
INTEGER*8 NK,N,K,I

NK=1
IF(XX.LE.X(I,1)) GO TO 10
DO 1 K=1,N
IF(X(I,K)-XX) 2,4,3
2 NK=K
1 CONTINUE
IF(NK.EQ.N) GO TO 5
3 A=Y(I,NK)
  B=Y(I,NK+1)
  C=X(I,NK)
  D=X(I,NK+1)
  INTP=A+((B-A)/(D-C))*(XX-C)
RETURN
4 INTP=Y(I,K)
RETURN
5 INTP=Y(I,N)
RETURN
10 INTP=Y(I,1)
RETURN
END FUNCTION
```

```
!-----
FUNCTION INTP2(N,X,Y,XX)
IMPLICIT NONE
REAL*8 X(1000),Y(1000),XX,INTP2,A,B,C,D
INTEGER*8 NK,N,K

NK=1
IF(XX.LE.X(1)) GO TO 10
```

```
DO 1 K=1,N
IF (X(K)-XX) 2,4,3
2 NK=K
1 CONTINUE
IF (NK.EQ.N) GO TO 5
3 A=Y(NK)
  B=Y(NK+1)
  C=X(NK)
  D=X(NK+1)
  INTP2=A+((B-A)/(D-C))*(XX-C)
RETURN
4 INTP2=Y(K)
RETURN
5 INTP2=Y(N)
RETURN
10 INTP2=Y(1)
RETURN
END FUNCTION
```

```
!-----
SUBROUTINE SOLVER(A,B,N)
IMPLICIT NONE
REAL*8 A(N,N),B(N),X(200),S
INTEGER*8 I,J,K,L
INTEGER*8 FAK,N1,I1
INTEGER*4 N
```

```
N1=N-1
DO 3 K=1,N
  I1=K+1
DO 2 I=I1,N
  FAK=-A(I,K)/A(K,K)
DO 1 J=K,N
1 A(I,J)=A(I,J)+FAK*A(K,J)
2 B(I)=B(I)+B(K)*FAK
3 CONTINUE
X(N)=B(N)/A(N,N)
DO 4 K=1,N1
  I=N-K
  S=0.0
DO 5 L=1,K
  J=I+L
5 S=S+A(I,J)*X(J)
4 X(I)=(B(I)-S)/A(I,I)
DO 6 I=1,N
B(I)=X(I)
6 CONTINUE
RETURN
END SUBROUTINE
```



## 7. ZAKLJUČAK

Izradom ovog diplomskog rada provedena je analiza strujanja u rukavcu Stara gornja i donja Neretva. Analiza je provedena pomoću jednodimenzionalnog matematičkog modela koji opisuje nestacionarno strujanje u otvorenim kanalima. Formulacija modela je izvedena na temelju jednadžbi nestacionarnog strujanja, te je ispisana u programskom jeziku Fortran95.

Kako rukavci nisu spojeni bilo je potrebno odrediti na koji način će se povezati. U tu svrhu definirane su dvije varijante, varijanta u kojoj se rukavci spajaju sa cijevi i varijanta u kojoj je spoj dva rukavca izveden s otvorenim kanalom. Kod varijante s cijevi potpuna izmjena vode se dogodila nakon 11,92 dana, dok je u drugoj varijanti to vrijeme skraćeno na 7,68 dana.

Vrijeme izmjene vode bi se moglo skratiti, ako bi na ulazu i izlazu iz rukavca ugradili ustave koje bi sprječavale ulaz vode u rukavac na južnoj ustavi ili izlaz vode iz rukavca na sjevernoj ustavi.

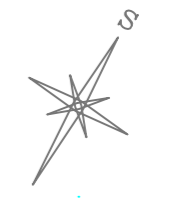
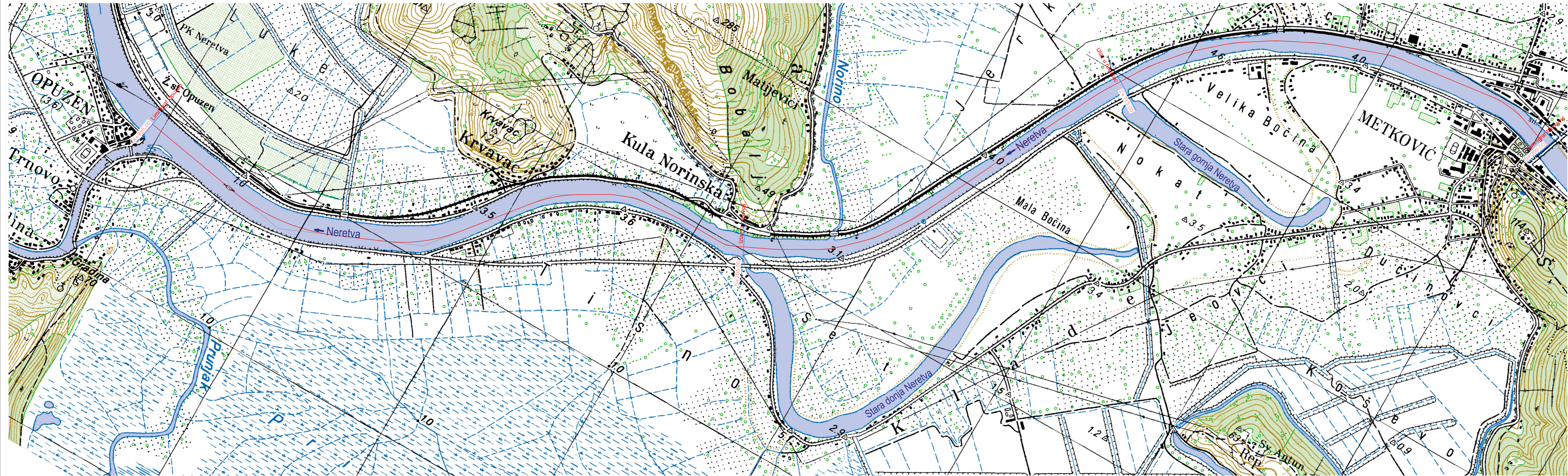
Procjenjuje se da bi se vrijeme izmjene skratilo za 20-25%. ali je tu brojku potrebno dokazati matematičkim modelom.

## 8. LITERATURA

- [1] V. Jović, Osnove hidromehanike, 2006.
- [2] V. Jović, Hidraulika - interna skripta, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu.
- [3] V. Jović, Analysis and modeling of non-steady flow in pipe and channel networks, John Wiley and Sons,Ltd, 2013.
- [4] The Newton-Raphson Method,  
<http://www.math.ubc.ca/~anstee/math104/newtonmethod.pdf>.
- [5] A. Harapin, Kratke osnove rada s programskim jezikom FORTRAN, Split: Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, 2009.
- [6] LF Fortran 95 Language Reference, LCS, Inc..
- [7] P. Sarajčev, Primjena Fortrana F90/95 u inženjerskim proračunima, Split: FESB, Zavod za elektroenergetiku, 2004.

## **9. PRILOZI**

- Prilog 1. Situacija glavnog toka Neretve
- Prilog 2. Situacija varijante 1 (cijev)
- Prilog 3. Situacija varijante 2 (kanal)
- Prilog 4. Nacrt Sjeverne ustave
- Prilog 5. Nacrt Južne ustave
- Prilog 6. Poprečni presjek na stacionaži 0+550,00 i 4+450,00 m
- Prilog 7. Poprečni presjek na stacionaži 1+415,00 i 1+650,00 m



Lokacija	Stacionaža (m)
Limnigraf Metković	0,0
Ulaž u rukavac	2715,0
Izlaz iz rukavca	5205,0
Limnigraf Opuzen	8995,0

**UCA** SVEUČILIŠTE U SPLITU,  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,  
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Diplomski rad

TEMA: Matematički model nestacionarnog strujanja na primjeru toka Stare Neretve

STUDENT: Tepić Ante, 633

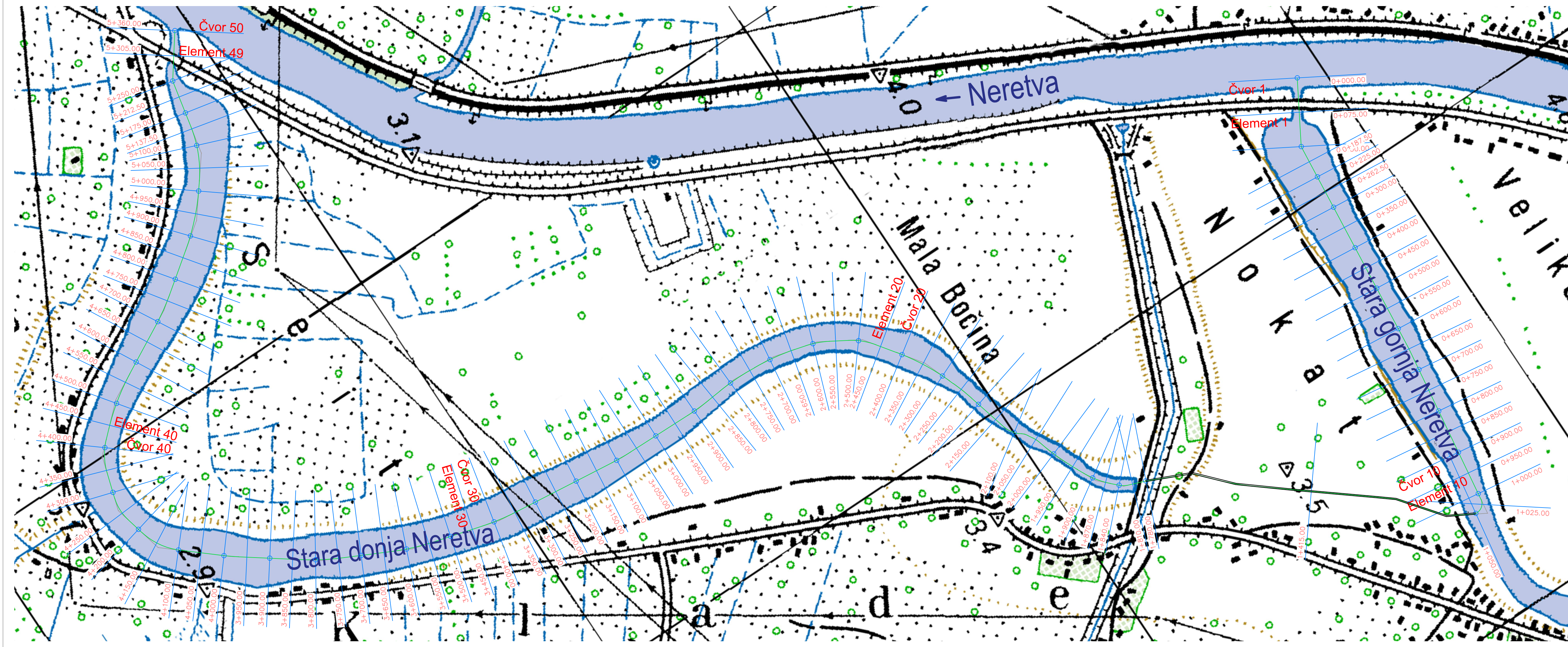
MENTOR: Doc. dr. sc. Davor Bojanić

SADRŽAJ: Situacija glavnog toka Neretve

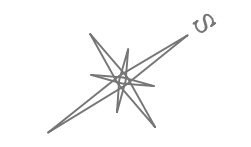
DATUM: rujan, 2018.

MJERILO: 1:10000

BROJ PRILOGA: 1



Oznaka čvora	Stacionaža čvora (m)	Oznaka elementa	Stacionaža elementa (m)	Vrsta elementa
1	0,0	1	75,0	Ustava
2	150,0	2	187,5	Kanal
3	225,0	3	262,5	Kanal
4	300,0	4	350,0	Kanal
5	400,0	5	450,0	Kanal
6	500,0	6	550,0	Kanal
7	600,0	7	650,0	Kanal
8	700,0	8	750,0	Kanal
9	800,0	9	850,0	Kanal
10	900,0	10	950,0	Kanal
11	1000,0	11	1025,0	Kanal
12	1050,0	12	1415,0	Cijev
13	1780,0	13	1810,0	Kanal
14	1840,0	14	1870,0	Kanal
15	1900,0	15	1950,0	Kanal
16	2000,0	16	2050,0	Kanal
17	2100,0	17	2150,0	Kanal
18	2200,0	18	2250,0	Kanal
19	2300,0	19	2350,0	Kanal
20	2400,0	20	2450,0	Kanal
21	2500,0	21	2550,0	Kanal
22	2600,0	22	2650,0	Kanal
23	2700,0	23	2750,0	Kanal
24	2800,0	24	2850,0	Kanal
25	2900,0	25	2950,0	Kanal
26	3000,0	26	3050,0	Kanal
27	3100,0	27	3150,0	Kanal
28	3200,0	28	3250,0	Kanal
29	3300,0	29	3350,0	Kanal
30	3400,0	30	3450,0	Kanal
31	3500,0	31	3550,0	Kanal
32	3600,0	32	3650,0	Kanal
33	3700,0	33	3750,0	Kanal
34	3800,0	34	3850,0	Kanal
35	3900,0	35	3950,0	Kanal
36	4000,0	36	4050,0	Kanal
37	4100,0	37	4150,0	Kanal
38	4200,0	38	4250,0	Kanal
39	4300,0	39	4350,0	Kanal
40	4400,0	40	4450,0	Kanal
41	4500,0	41	4550,0	Kanal
42	4600,0	42	4650,0	Kanal
43	4700,0	43	4750,0	Kanal
44	4800,0	44	4850,0	Kanal
45	4900,0	45	4950,0	Kanal
46	5000,0	46	5050,0	Kanal
47	5100,0	47	5137,5	Kanal
48	5175,0	48	5212,5	Kanal
49	5250,0	49	5305,0	Ustava
50	5360,0			




**SVEUČILIŠTE U SPLITU,**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,**  
**ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Diplomski rad

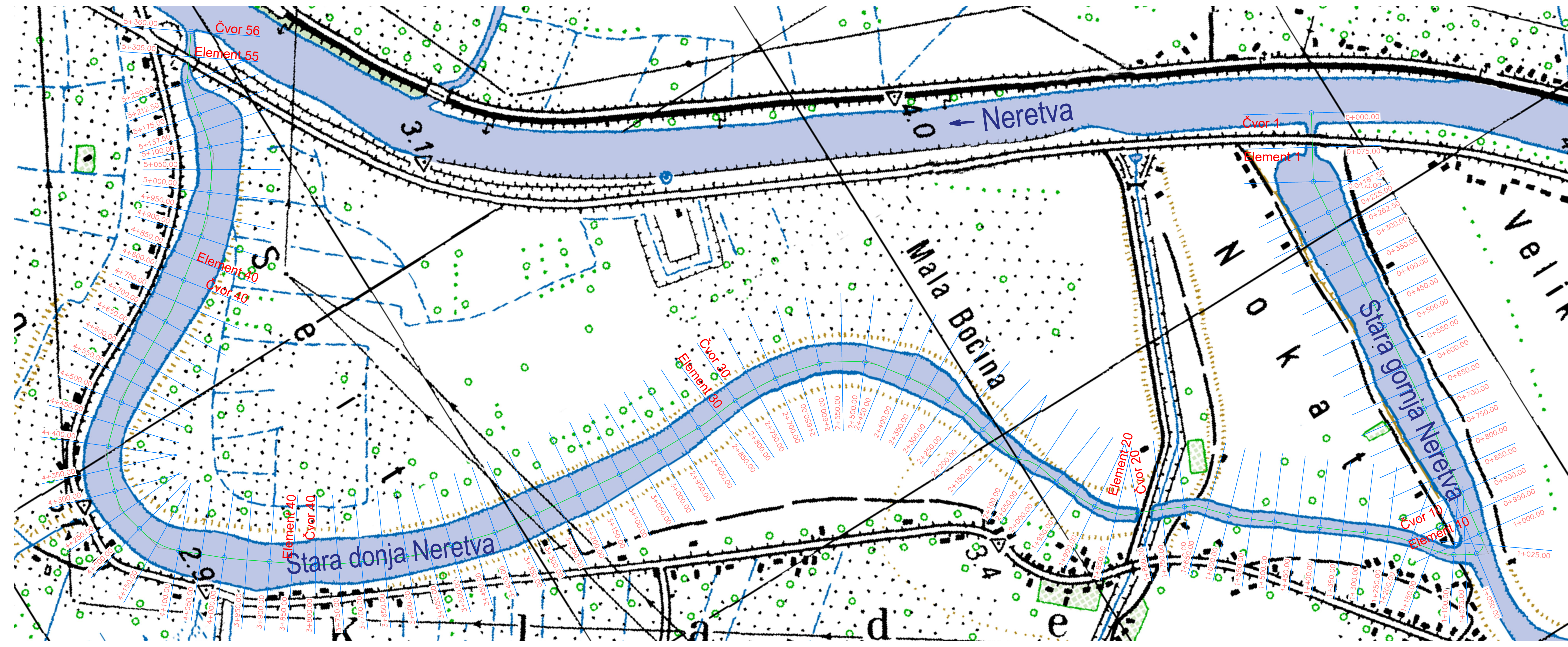
TEMA: Matematički model nestacionarog strujanja na primjeru toka Stare Neretve

STUDENT: Tepić Ante, 633

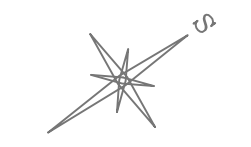
MENTOR: Doc. dr. sc. Davor Bojanić

SADRŽAJ: Situacija varijante 1 (cijev) MJERILO: 1:5000

DATUM: rujan, 2018. BROJ PRILOGA: 2



Oznaka čvora	Stacionaža čvora (m)	Oznaka elementa	Stacionaža elementa (m)	Vrsta elementa
1	0,0	1	75,0	Ustava
2	150,0	2	187,5	Kanal
3	225,0	3	262,5	Kanal
4	300,0	4	350,0	Kanal
5	400,0	5	450,0	Kanal
6	500,0	6	550,0	Kanal
7	600,0	7	650,0	Kanal
8	700,0	8	750,0	Kanal
9	800,0	9	850,0	Kanal
10	900,0	10	950,0	Kanal
11	1000,0	11	1025,0	Kanal
12	1050,0	12	1075,0	Kanal
13	1100,0	13	1150,0	Kanal
14	1200,0	14	1250,0	Kanal
15	1300,0	15	1350,0	Kanal
16	1400,0	16	1450,0	Kanal
17	1500,0	17	1550,0	Kanal
18	1600,0	18	1650,0	Kanal
19	1700,0	19	1750,0	Kanal
20	1800,0	20	1850,0	Kanal
21	1900,0	21	1950,0	Kanal
22	2000,0	22	2050,0	Kanal
23	2100,0	23	2150,0	Kanal
24	2200,0	24	2250,0	Kanal
25	2300,0	25	2350,0	Kanal
26	2400,0	26	2450,0	Kanal
27	2500,0	27	2550,0	Kanal
28	2600,0	28	2650,0	Kanal
29	2700,0	29	2750,0	Kanal
30	2800,0	30	2850,0	Kanal
31	2900,0	31	2950,0	Kanal
32	3000,0	32	3050,0	Kanal
33	3100,0	33	3150,0	Kanal
34	3200,0	34	3250,0	Kanal
35	3300,0	35	3350,0	Kanal
36	3400,0	36	3450,0	Kanal
37	3500,0	37	3550,0	Kanal
38	3600,0	38	3650,0	Kanal
39	3700,0	39	3750,0	Kanal
40	3800,0	40	3850,0	Kanal
41	3900,0	41	3950,0	Kanal
42	4000,0	42	4050,0	Kanal
43	4100,0	43	4150,0	Kanal
44	4200,0	44	4250,0	Kanal
45	4300,0	45	4350,0	Kanal
46	4400,0	46	4450,0	Kanal
47	4500,0	47	4550,0	Kanal
48	4600,0	48	4650,0	Kanal
49	4700,0	49	4750,0	Kanal
50	4800,0	50	4850,0	Kanal
51	4900,0	51	4950,0	Kanal
52	5000,0	52	5050,0	Kanal
53	5100,0	53	5137,5	Kanal
54	5175,0	54	5212,5	Kanal
55	5250,0	55	5305,0	Ustava
56	5360,0			




**SVEUČILIŠTE U SPLITU,**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,**  
**ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

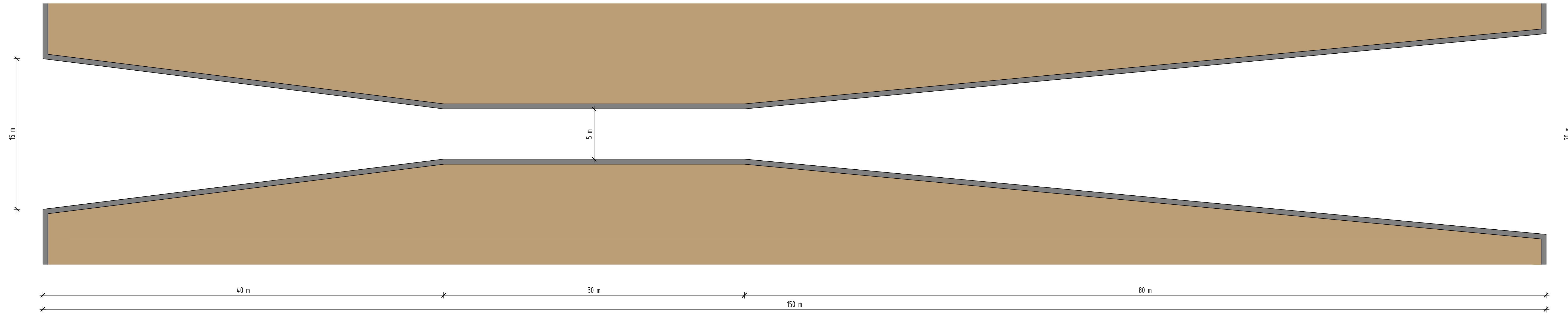
**Diplomski rad**

TEMA: Matematički model nestacionarog strujanja na primjeru toka Stare Neretve

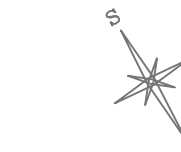
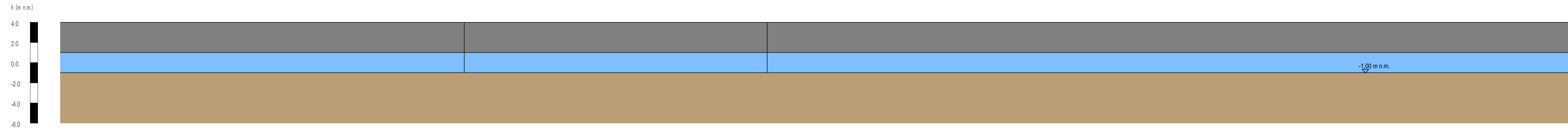
STUDENT: Tepić Ante, 633  
 MENTOR: Doc. dr. sc. Davor Bojanić

SADRŽAJ: Situacija varijante 2 (kanal)      MJERILO: 1:5000  
 DATUM: rujan, 2018.      BROJ PRILOGA: 3

Tlocrt Sjeverne ustave

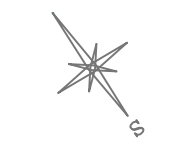
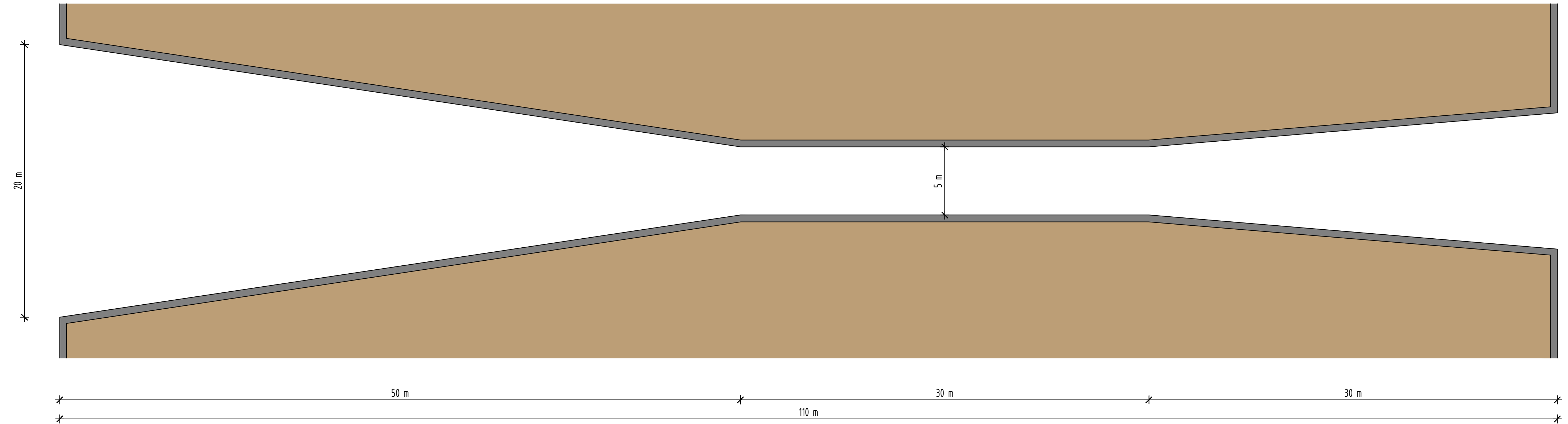


Uzdužni presjek Sjeverne ustave

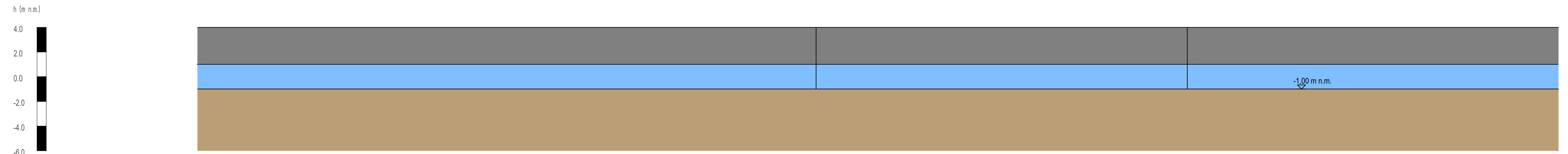


	
<b>Diplomski rad</b>	
TEMA	Matematički model nestacionarog strujanja na primjeru toka Stare Neretve
STUDENT	Tepić Ante, 633
MENTOR	Doc. dr. sc. Davor Bojanić
SADRŽAJ	Nacrt Sjeverne ustave
DATUM	rujan, 2018.
MJERILO	1:200
BROJ PRILOGA	4

Tlocrt Južne ustave



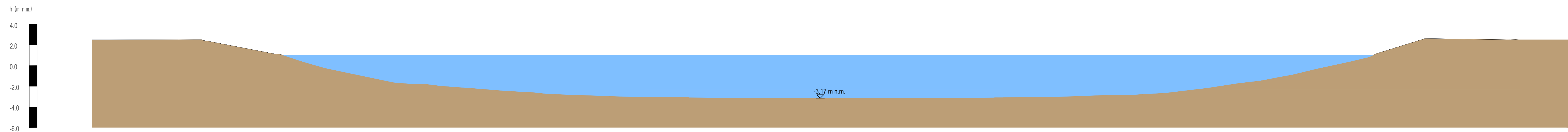
Uzdužni presjek Južne ustave



		SVEUČILIŠTE U SPLITU, FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE	
		Diplomski rad	
TEMA	Matematički model nestacionarog strujanja na primjeru toka Stare Neretve		
STUDENT	Tepić Ante, 633		
MENTOR	Doc. dr. sc. Davor Bojanić		
SADRŽAJ	Nacrt Južne ustave	MJERILO	1:200
DATUM	rujan, 2018.	BROJ PRILOGA	5



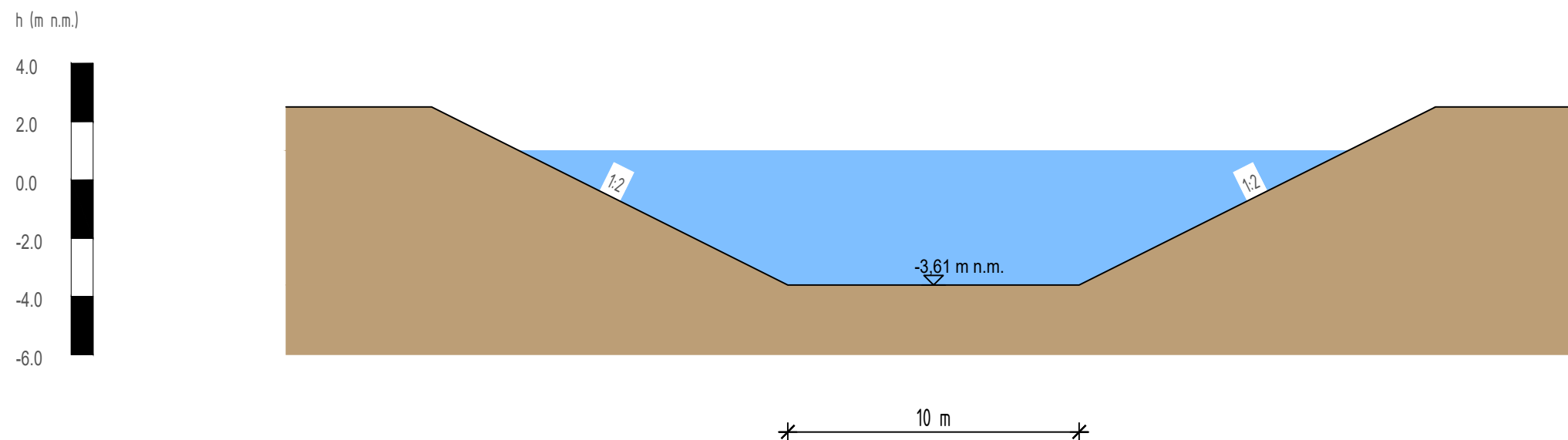
Poprečni presjek u sredini elementa na stacionaži 0+550.00 m



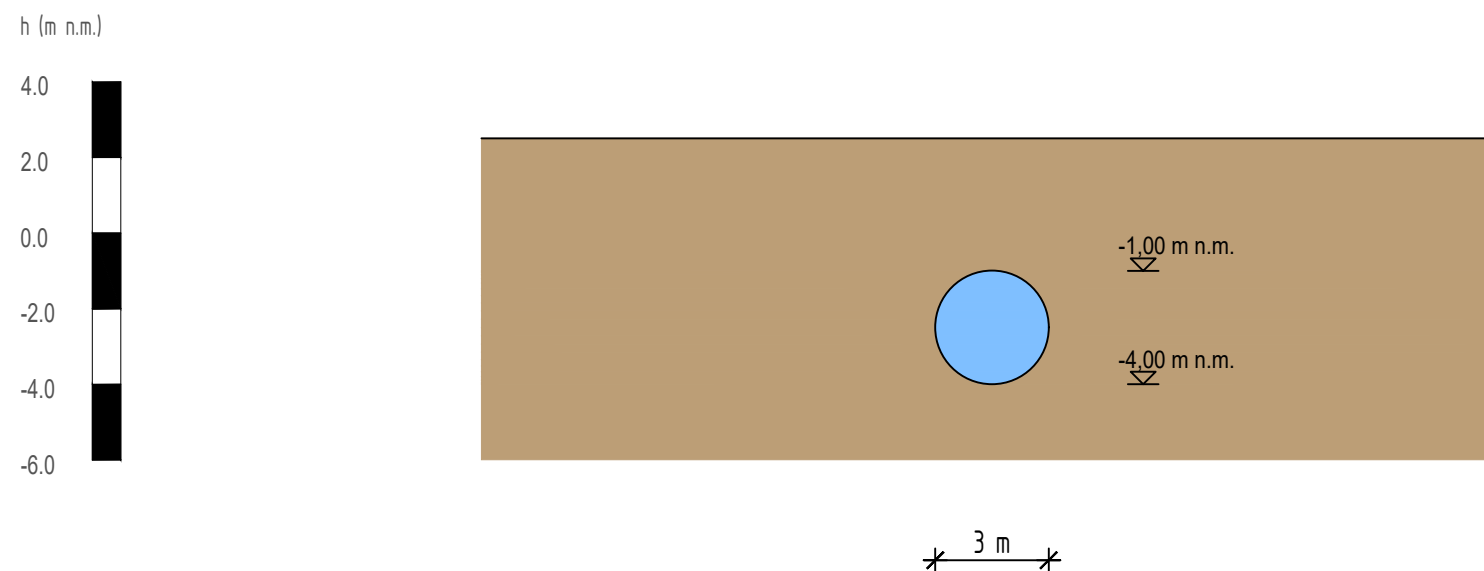
Poprečni presjek u sredini elementa na stacionaži 4+450.00 m



Poprečni presjek u sredini elementa na stacionaži 1+650.00 m - varijanta s kanalom



Poprečni presjek u sredini elementa na stacionaži 1+415.00 m - varijanta sa cijevi



 SVEUČILIŠTE U SPLITU, FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE		
		<b>Diplomski rad</b>
TEMA	Matematički model nestacionarog strujanja na primjeru toka Stare Neretve	
STUDENT	Tepić Ante, 633	
MENTOR	Doc. dr. sc. Davor Bojanić	
SADRŽAJ	Poprečni presjek na stacionaži 1+415,00 i 1+650,00 m	MJERILO 1:200
DATUM	rujan, 2018.	BROJ PRILOGA 7